

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Tomislav Batković**

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Prof. dr. sc. Hinko Wolf, dipl. ing.

Student:

Tomislav Batković

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentor prof. dr . sc Hinku Wolfu i prof.dr.sc Zvonku Heroldu na stručnoj pomoći i savjetima prilikom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se svojoj obitelji, kolegama i prijateljima koji su mi bili podrška tijekom studiranja.

Tomislav Batković



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## **DIPLOMSKI ZADATAK**

Student:

Mat. br.:

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku:

Naslov rada na  
engleskom jeziku:

Opis zadatka:

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zvonimir Guzović

## SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. TIPOVI VIBRACIJSKIH KONVEJERA .....	3
2.1. Tipovi mehanizma uzbude .....	4
2.1.1 Klipna uzbuda .....	5
2.1.2 Uzbuda ekscentritetom.....	5
2.1.3 Uzbuda elektromagnetom .....	7
2.1.4 Pneumatska/hidraulična uzbuda.....	8
2.2. Tipovi konvejera i tipovi čestica/proizvoda na konvejeru .....	9
2.3. Tipovi elastičnih elemenata (opruga).....	11
2.4. Tipovi prigušenja vibracija na podlogu .....	12
2.5. Kretanja čestica na konvejeru .....	13
3. PRORAČUN .....	16
3.1. Proračun dobave materijala.....	17
3.1.1 Maksimalna i minimalna teoretska brzina čestica na konvejeru.....	17
3.1.2 Maksimalna i minimalna brzina čestica pijeska na konvejeru.....	18
3.2. Proračun ekscentriteta .....	19
3.2.1 Masa vibracijskog konvejera.....	19
3.2.2 Moment na ulazu u vratilo .....	20
3.2.3 Centrifugalna sila i masa ekscentra .....	22
3.3. Odabir elastičnih elemenata .....	24
3.4. Proračun zupčanika .....	26
3.5. Odabir elektromotora i frekvencijskog pretvarača.....	31
3.6. Odabir remenice .....	33
3.7. Proračun vratila .....	36
3.6.1 Odabir ležaja .....	42
3.8. Kontrolni proračun dinamičke sigurnosti vratila .....	46
3.9. Elastične karakteristike vratila .....	52
3.9.1 Savojne elastične deformacije vratila.....	52
3.9.2 Uvojne elastične deformacije vratila.....	58
3.10. Proračun kritične brzine vratila.....	59
3.10.1 Kritična brzina kod savijanja.....	59
3.10.1 Kritična brzina kod uvijanja.....	59
3.11. Proračun kritičnih presjeka konvejera.....	60
3.11.1 Proračun kritičnog presjeka ekscentra .....	60
3.11.2 Proračun kritičnog presjeka ekscentra .....	61
4. ZAKLJUČAK.....	64

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Prikaz postupka izrade cementa .....	2
Slika 2.	Princip rada kombajna .....	2
Slika 3.	Slobodno oscilirajuće tehnike [23] .....	3
Slika 4.	Tipovi mehanizama uzbude [28] .....	4
Slika 5.	Princip rada konvejera sa klipnom uzbudom [21] .....	5
Slika 6.	Direktna uzbuda ekscentritetom [20] .....	6
Slika 7.	Posredna uzbuda ekscentritetom [20] .....	6
Slika 8.	Prikaz pogona posredne i direktne uzbude ekscentritetom [21] .....	7
Slika 9.	Prikaz principa rada konvejera sa elektromagnetnom uzbudom [22] .....	7
Slika 10.	Pneumatski vibracijski konvejer [26] .....	8
Slika 11.	Zatvoreni (obli) i otvoreni (pravokutni) tip konvejera [21] .....	9
Slika 12.	Specijalni tipovi otvora [20] .....	9
Slika 13.	Prikaz konstrukcijskih izvedbi konvejera .....	10
Slika 14.	Tipovi čestica na vibracijskim konvejerima [25] .....	10
Slika 15.	Izvedbe elastičnih elemenata na konvejerima [21] .....	11
Slika 16.	Tipovi izolacije konvejera [24] .....	12
Slika 17.	Gibanje čestica kod vibro konvejera [21] .....	13
Slika 18.	Tipovi konvejera u ovisnosti o veličini dijametra čestice [27] .....	13
Slika 19.	Putanja čestice i ploče konvejera [21] .....	14
Slika 20.	Brzina transporta čestica u ovisnosti o kutu uzbude [21] .....	15
Slika 21.	Princip rada vibracijskog konvejera [23] .....	16
Slika 22.	Ploča konvejera [23] .....	17
Slika 23.	Dijagram brzina – amplituda [5] .....	19
Slika 24.	Ekscentar i raspored momenata tromosti .....	20
Slika 25.	Prikaz mase koja se giba u po pravilu sinusoide .....	21
Slika 27.	Dijagram funkcija povećanja – bezdimenzijski parametar $\eta$ .....	22
Slika 26.	Model sustava [16] .....	22
Slika 28.	Uključivanje i isključivanje vibrokonvejera .....	23
Slika 29.	Centrifugalna sila .....	23
Slika 30.	Težište vibracijskog konvejera .....	24
Slika 31.	Karakteristika odabrane opruge .....	25
Slika 32.	Dijagram izolacije vibracija .....	25
Slika 33.	Zupčanicu u zahvatu i raspodjela sila [10] .....	29
Slika 34.	Stupanj prekrivanja kod kosih zubi [9] .....	30
Slika 35.	Tehnička specifikacija elektromotora [6] .....	31
Slika 36.	Karakteristika elektromotora .....	31
Slika 37.	Selekcijska karta frekvencijskog pretvarača [7] .....	32
Slika 38.	Raspored sila u horizontalnoj i vertikalnoj ravnini na vratilu .....	37
Slika 39.	Dimenzije vratila i presjeci .....	37
Slika 40.	Odabrani ležaj za ležajno mjesto A[12] .....	43
Slika 41.	Odabrani ležaj za ležajno mjesto A[12] .....	45
Slika 42.	Dijagram za odabir ulja [14] .....	45
Slika 43.	Odabrane vrijednosti $\beta_{kt}$ i $\beta_{kf}$ za presjek 2 .....	46
Slika 44.	Faktori površine i strojnog dijela za presjek 2 .....	47
Slika 45.	Odabrane vrijednosti $\beta_{kt}$ i $\beta_{kf}$ za presjek 3 .....	48

Slika 46.	Faktori površine i strojnog dijela za presjek 3 .....	49
Slika 47.	Odabrane vrijednosti $\beta_{kt}$ i $\beta_{kf}$ za presjek 4,5,6 .....	50
Slika 48.	Faktori površine i strojnog dijela za presjek 4,5,6 .....	51
Slika 49.	Nagibi i progibi elastične linije .....	52
Slika 50.	Kut uvijanja vratila .....	58
Slika 51.	Simulacija kritičnih presjeka na ekscentru .....	60
Slika 52.	Krivulja ubrzanja .....	60
Slika 53.	Kritične točke zavora .....	61
Slika 54.	Pločica i površine zavora .....	62

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Vrijednosti faktora $K_r$ [23].....	14
Tablica 2. Tablica za odabir tipa remena [8].....	33
Tablica 3. Poly V remen [8] .....	34
Tablica 4. Tablica za odabir manje remenice [8] .....	34
Tablica 5. Tablica podešavanja remena [8].....	35
Tablica 6. Odabir snage po rebru remena [8].....	35
Tablica 7. Tablica faktora primjene [11].....	36



## **POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE**

072015 - 1 Vibracijski konvejer

072015 - 2 Sklop ekscentra

072015 - 3 Vratilo I

072015 - 4 Vratilo II

072015 - 5 Poklopac pogonskog vratila

072015 - 6 Poklopac gonjenog vratila

072015 - 7 Kućište

072015 - 8 Poklopac kućišta

072015 - 9 Ekscentar

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$Q, Q_1, Q_2$	$\text{m}^3 / \text{h}$	Protočna količina
$V_p, V_{p_1}, V_{p_2}$	$\text{m} / \text{h}$	Teoretska brzina proizvoda
$\rho_p$	$\text{kg} / \text{m}^3$	Gustoća pijeska
$K_r$		Faktor materijala
$m_p$	$\text{kg}$	Masa pijeska
$m_{pL}$	$\text{kg}$	Masa vibracijske ploče
$m_{EU}$	$\text{kg}$	Masa ekscentra
$m_{UV}$	$\text{kg}$	Ukupna masa koja vibrira
$\varepsilon$	$\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$	Kutno ubrzanje
$J_{zz}$	$\text{kgm}^2$	Dinamički momenat tromosti
$T_D$	$\text{Nm}$	Moment potreban za pokretanje ekscentra
$P_{gz}$		Gubici zupčanika
$P_{gL}$		Gubici ležaja
$P_{gBB}$		Gubici uslijed podmazivanja
$\Omega$	$\text{s}^{-1}$	Frekvencija uzbude
$P_t$	$\text{W}$	Snaga potrebna na vratilu I
$sw$	$\text{mm}$	Dvostruka amplituda
$\eta$		Bezdimenzijski parametar omjera uzbudne i vlastite kružne frekvencije
$c$		Krutost
$\omega$		Vlastita kružna frekvencija
$x$		Amplituda
$F_{CS}$	$\text{N}$	Centrifugalna sila
$e$	$\text{mm}$	ekscentritet

$c_U$	$\frac{N}{m}$	Ukupna potrebna krutost
$c_O$	$\frac{N}{m}$	Krutost pojedine opruge
$f_e$	Hz	Kružna frekvencija
$m$	mm	Modul zupčanika
$Y_F$		Faktor oblika
$Y_\beta$		Faktor utjecaja kuta nagiba zuba
$K_A$		Faktor udara
$K_V$		Dinamički faktor
$z_1$		Broj zuba
$n_{RS}$	$\text{min}^{-1}$	Broj okretaja radnog stroja
$n_{EM}$	$\text{min}^{-1}$	Broj okretaja elektromotora
$\sigma_{F_{dop}}$	$\frac{N}{\text{mm}^2}$	Dopušteno naprezanje
$S_{\tau_{DN}}, S_F$		Faktori sigurnosti
$T_1'$	Nm	Ukupan potreban moment na radnom stroju
$\Phi$		Omjer dimenzija
$\varepsilon_\beta$		Faktor prekrivanja zupčanika
$\beta$	°	Kut nagiba zuba
$d_1, d_2$	mm	Diobeni promjeri zupčanika
$r_{n1}, r_{n2}$	mm	Radijusi fiktivnih zupčanika
$z_{n1}, z_{n2}$		Broj fiktivnih zubi
$\alpha_t$	°	Čelni kut zahvatne crte
$\beta_{b1}$	°	Kut nagiba boka na temeljnoj kružnici
$\alpha_{tw}$	°	Pogonski kut zahvatne crte
$d_{w1}, d_{w2}$	mm	Promjeri kinematskih kružnica
$d_{a1}, d_{a2}$	mm	Tjemeni promjeri
$d_{f1}, d_{f2}$	mm	Podnožni promjeri
$m_t$	mm	Čeoni razmak
$a_n$	mm	Računski razmak osi

$a$	mm	Razmak osi
$c_z$	mm	Postojeća tjemena zračnost
$c_{\min}$	mm	Najmanja dopuštena tjemena zračnost
$k_m$	mm	Skraćenje glave
$d_{ak1}$	mm	Tjemeni promjer nakon skraćanja glave
$r_{b1}, r_{b2}$	mm	Radijusi temeljnih kružnica
$d_{REM}$	mm	Dijametar pogonske remenice
$d_{RRS}$	mm	Dijametar remenice na strani radnog stroja
$ip$		Prijenosni omjer
$S_O, S_F$		Faktori sigurnosti remena
$P_p$	W	Proračunska snaga remena
$C_R$	mm	Efektivna udaljenost od centra do centra remena
$C_{FR}$		Korekcijski faktor udaljenosti remena
$C_{KK}$		Korekcijski faktor kuta kontakta
$P_R$	W	Potrebna snaga po rebru remena
$n_R$		Potreban broj rebara
$F_{PR}$	N	Sila prednaprezanja na remenu
$F_{t1}$	N	Tangencijalna obodna sila
$F_{r1}$	N	Radijalna sila
$F_{a1}$	N	Aksijalna sila
$F_A, F_B$	N	Reakcije u osloncima
$\sigma_{fDNdop}$	$\frac{N}{mm^2}$	Dopušteno fleksijsko naprezanje
$L_h$	h	Broj sati ležaja
$C$	N	Dinamička nosivost ležaja
$C_0$	N	Statička nosivost ležaja

## **SAŽETAK**

Tema ovog rada je projektiranje uređaja za transport čestica. Uređaj koji je projektiran je baziran na mehaničkim vibracijama i radu u nadrezonantnom području rada. Potreba uređaja je da bude relativno lagan za montažu i demontažu i kao takav nije mogao biti projektiran sa temeljnom elastičnom pločom što bi rezultiralo povećanjem mase

Opisani su tipovi vibracijskih konvejera i njihova primjena.

Proračun obuhvaća proračun vratila, zupčanika, ekscentra, potrebnih sila, ležaja, elastičnih elemenata, zavarenih spojeva

Korišteni su programski paketi Wolfram Mathematica, SolidWorks Premium

Ključne riječi: Vibracije, Vibracijski konvejer, transport tereta,

## **SUMMARY**

Topic of this work is making of device for material transport. Designed device is based on mechanical vibrations and work in above resonance. Device had to be designed to be easy for assembly and disassembly and therefore it couldn't be designed with elastic base which would increase mass significantly.

Types of vibratory conveyors a purpose are described in text.

Calculus covers shafts, gears, eccentric mass, bearings, elastic elements, welds, belts

Programs used were Wolfram Mathematica, SolidWorks Premium

Key words: Vibrations, Vibratory conveyor, material transport

## 1. UVOD

Još od najranijeg doba ljudska se vrsta koristi metodama za usitnjavanje čestica. To se može primijetiti od trenutka kad su ljudi prestali biti isključivo nomadi i kada su se počeli baviti ratarstvom.

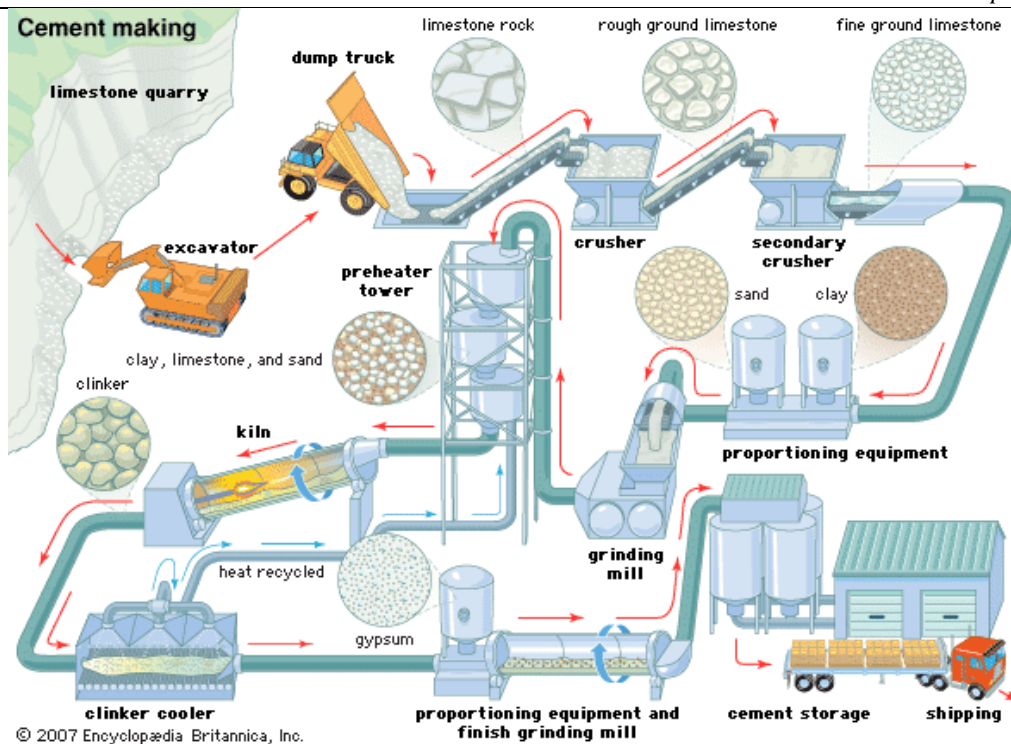
Glavna grana ratarstva su žitarice i od najranijih dana je bilo potrebno odstraniti neželjene čestice iz, primjerice žita, zobu, riže...

Vrlo brzo ljudi su shvatili da ako djeluju uzbuđom(amplitude i frekvencije) mogu vrlo jednostavno odstraniti te čestice. Ako određenu količinu žita stavimo na određenu površinu i krenemo djelovati sa pomakom neke frekvencije na nju, možemo primijetiti da se žito ponaša poput fluida. Teže će čestice „potonuti“ na dno, dok će se lakše poput isušenih zrna žita izdvojiti na vrh. Kasnijom pojavom sita postalo je moguće definirati veličinu zrna brašna koje je derivat žita.

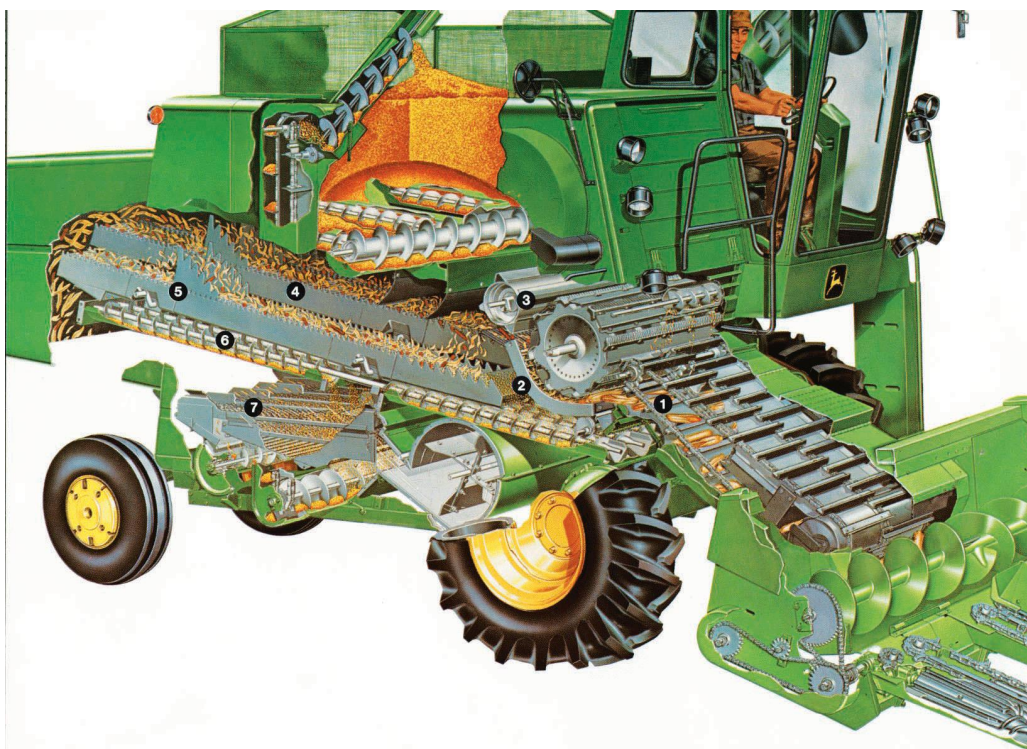
Razvojem industrije i paralelno postepenom automatizacijom iste, pojavila se potreba za razvojem uređaja za transport, usitnjavanje i sortiranje namirnica i materijala. Ta potreba je izražena u prehrambenoj i prerađivačkoj industriji.

Jedan od dobrih primjera su cementare. Nakon što se sirovina eksploatira sa kamenoloma usitnjava se u drobilicama do određenih veličina granula ( 1 – 8 cm) te se veće granule izdvajaju vibrokonvejerima i vraćaju natrag u drobolicu na ponovnu obradu . Nakon homogenizacije, sirovina se transportira u peći dok se ne formira cementni klinker te se isti izbacuje iz peći. Nakon toga, klinker se transportira u mlin gdje se isti melje u fini prah. Iz mlina cement ispada u „grudama“ i neravnomjerno raspoređen na traku vibrokonvejera gdje se rasitnjava, ujednačuje, mjeri se količina i težina cementa, te se pakira u vreće (Slika 1).

Kombajn je također dobar primjer izdvajanja čestica (Slika 2). U ovom primjeru je vidljivo izdvajanje lakših čestica od sirovine preko vibracionog konvejera unutar kombajna



Slika 1. Prikaz postupka izrade cementa



Slika 2. Princip rada kombajna

Bitno je napomenuti da bi današnja industrija bila gotovo nezamisliva bez ovakvih tipova uređaja. Takvi uređaji se danas koriste kao dozeri, kako bi što ujednačenije rasporedili sirovinu i kako bi uklonili neželjene čestice sa željenog proizvoda.



## 2. TIPOVI VIBRACIJSKIH KONVEJERA

Vibracijske konvejure dijelimo u dvije tehnike :

- slobodno oscilirajući sistemi
- oscilirajući sistemi blizu rezonantnog područja – iako su zanimljivi radi izrazito velikih amplituda, radi svoje kompleksnosti neće biti tema ovog rada

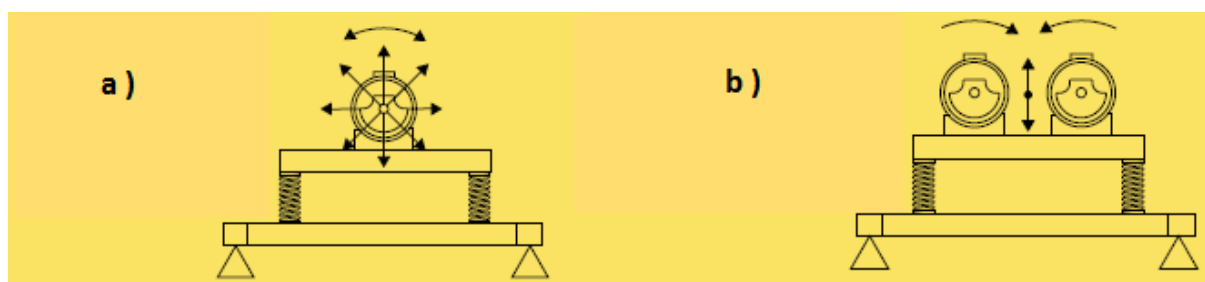
Slobodno oscilirajuće dijelimo prema dva principa rada:

a) rotacijska metoda

- uzbudna sila je usmjerena u svim smjerovima ( $360^\circ$ ), u rotacionom režimu. Treba napomenuti da je kod ove metode ploča konvejera pod određenom kosinom ( ovisno o materijalu koji se transportira )
- princip rada se sastoji u tome da jedan ekscentar rotira u svim smjerovima te tjera čestice da se kreću, kosina pomaže česticama da „kliznu“ niz ploču

b) jednosmjerna metoda

- uzbudna sila usmjerena u jednom smjeru u sinusnom izmjeničnom režimu
- princip rada se sastoji u tome da dva ekscentra daju resultantnu centrifugalnu silu koja djeluje u jednom smjeru, te inducira gibanje čestica u smjeru te centrifugalne sile



**Slika 3. Slobodno oscilirajuće tehnike [23]**

Treba napomenuti da se kod jednosmjerne metode može postaviti položaj uzbude ovisno o potrebi.

Glavni fokus ovog rada će biti na slobodno oscilirajuće sisteme

## 2.1. Tipovi mehanizma uzbude

Kod vibracijskih konvejera postoje četiri osnovna tipa mehanizma uzbude koji su prikazani na slici 4. Potrebno je napomenuti da je konvejer sa piezoelektričnom uzbudom u razvoju, ali uređaj kao takav još nije doživio komercijalnu upotrebu. Princip rada ovog konvejera će također biti opisan u nastavku.

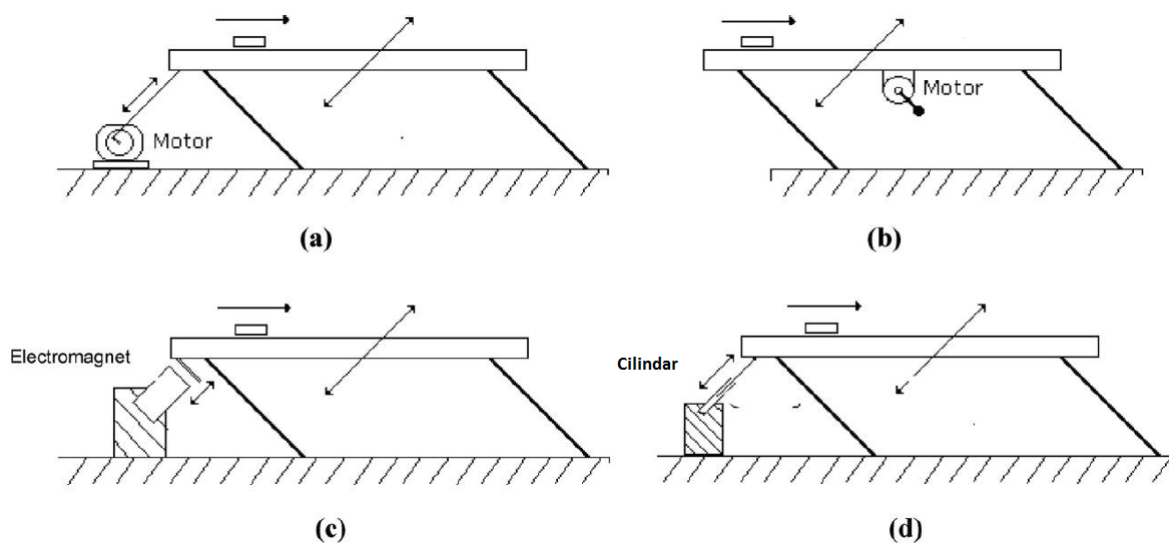
Konvejeri sa klipnom i ekscentar uzbudom još se nazivaju i konvejeri sirove snage („brute force feeders / screeners“)

Tipovi uzbude su kod ovih tipova uređaja : a) klipna uzbuda

b) uzbuda ekscentrom

c) uzbuda elektromagnetom

d) pneumatska/hidraulična uzbuda



Slika 4. Tipovi mehanizama uzbude [28]

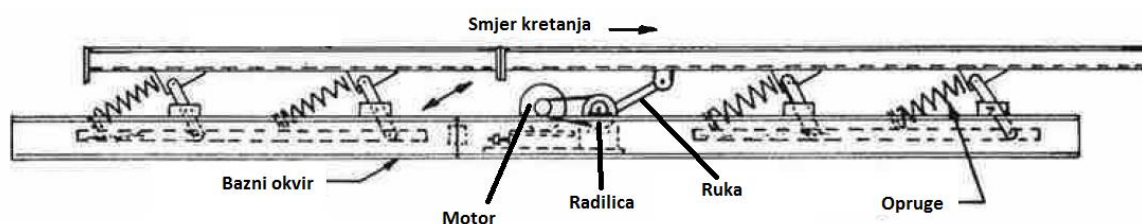
### 2.1.1 Klipna uzbuda

Iako su u samim počecima bili izrazito popularni, danas su relativno rijetki u proizvodnji.

Ovakav tip konvejera se naziva i „brute force“ konvejer

Dobri su za tipove proizvodnje gdje se ne mora mijenjati amplituda ili kut uzbude. Sama konstrukcija ovakvih uređaja je relativno jednostavna, a radi grube konstrukcije relativno ih je jednostavno i održavati.

Uzbuda se generira kod ovakvih uređaja uglavnom posredno preko remenice te prenosi na radilicu koja preko ruke prenosi uzbudnu silu na ploču konvejera. Amplituda vibracija se uglavnom podešava promjenom duljine ručice, a frekvencija s frekvencijskim pretvaračem na motoru. Treba napomenuti da se amplituda vibracija na ovim uređajima rijetko mijenja.



Slika 5. Princip rada konvejera sa klipnom uzbudom [21]

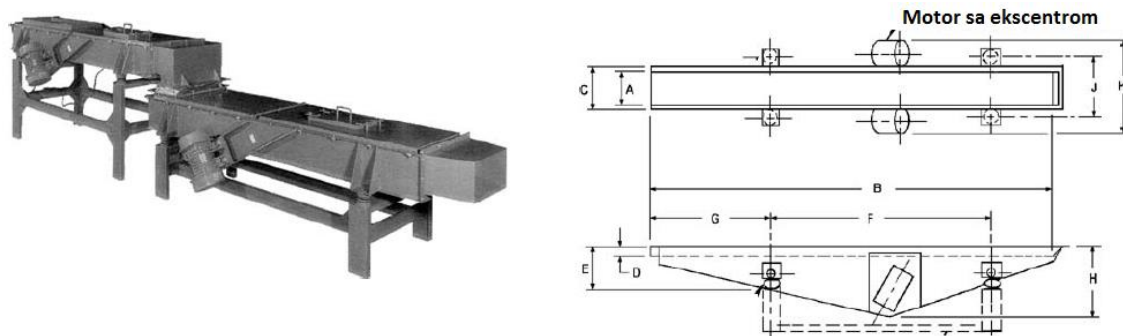
### 2.1.2 Uzbuda ekscentritetom

Uzbuda ekscentritetom je uz elektromagnetsku uzbudu najčešći oblik uzbude kod vibracijskih konvejera. Ovaj tip konvejera se isto naziva „brute force“ konvejer.

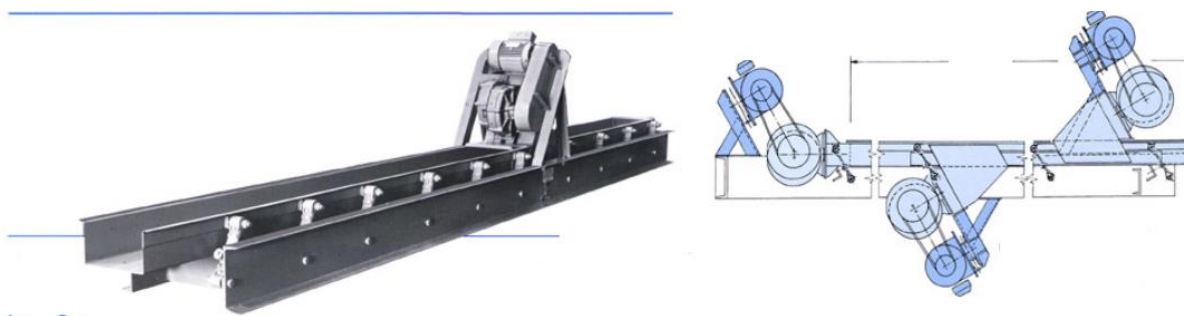
U praksi se koriste dva tipa ovakvih konvejera: sa posrednom i s direktnom uzbudom. Iako je posredna uzbuda bila dominantna, u zadnje vrijeme se uglavnom koristi direktna uzbuda i to isključivo radi praktičnih razloga. Naime, direktna uzbuda se sastoji od elektromotora sa ekscentritetom već namontiranim na elektromotor, te je samim tim zamjena prilično jednostavna. Treba napomenuti da su uređaji sa direktnom uzbudom u pravilu kompaktne izvedbe, te je relativno jednostavno korigirati ekscentritet na takvom tipu uređaja.

Kod direktne uzbude uglavnom se koriste dva ekscentar elektromotora, kako bi sila na oba boka uređaja bila jednaka. Jedan motor se koristi ako je potrebno izdvojiti neželjene čestice, poput recimo sitnih komadića ugljena od krupnih (Screening)

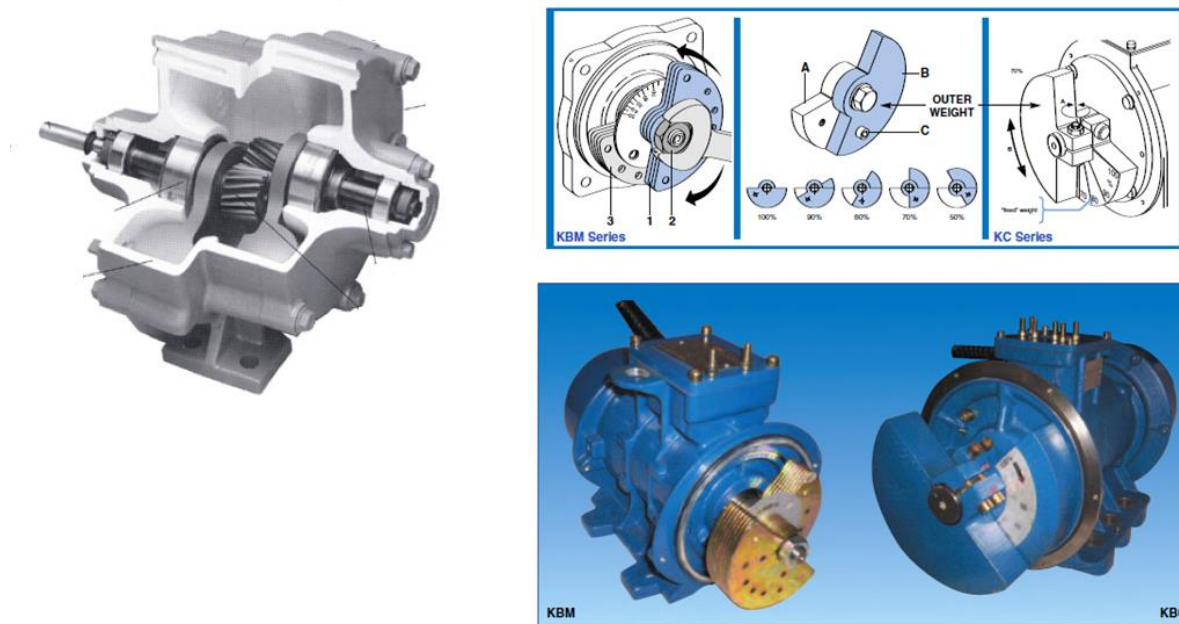
Posredna uzbuda se koristi uglavnom kod uređaja gdje su potrebne velike sile i amplitude vibracija te su takvi uređaji u većini slučajeva rađeni na zahtjev kupca.



**Slika 6. Direktna uzbuda ekscentritetom [20]**



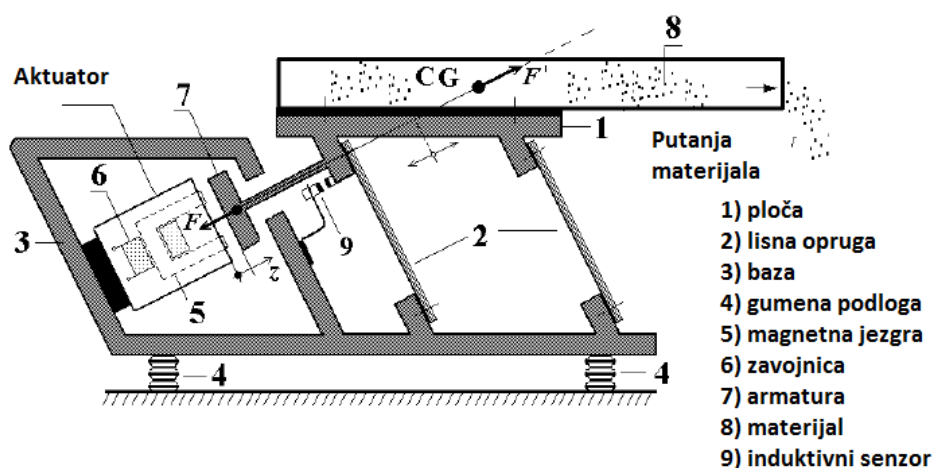
**Slika 7. Posredna uzbuda ekscentritetom [20]**



Slika 8. Prikaz pogona posredne i direktne uzbude ekscentritetom [21]

### 2.1.3 Uzbuda elektromagnetom

Ovakav tip uzbude je dosta raširen u industriji gdje je potrebno doziranje materijala. Uređaji sa ovakvom uzbudom su najefikasniji i relativno jednostavni za održavanje. Pri upotrebi relativno je jednostavno mijenjati amplitudu i frekvenciju uzbude, dok problem predstavlja količina materijala na ploči. Pri većim količinama materijala na ploči ovakav tip uređaja gubi drastično na efikasnosti, a moguće smanjenje amplitude je do 10 puta!<sup>1</sup>

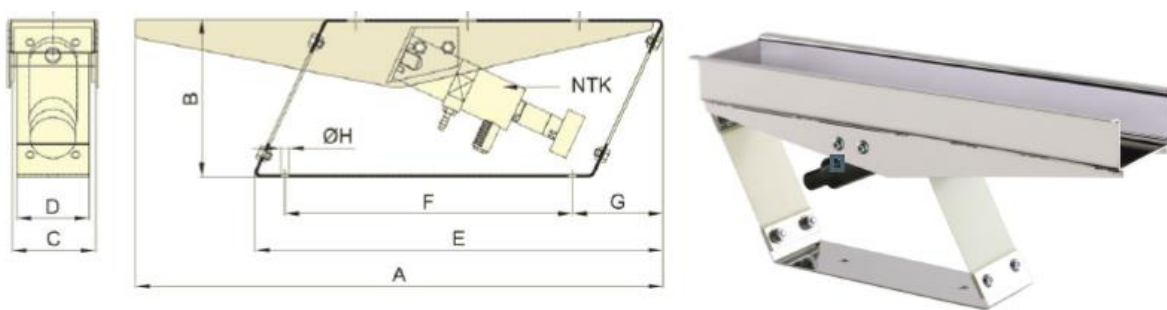


Slika 9. Prikaz principa rada konvejera sa elektromagnetnom uzbudom [22]

<sup>1</sup> Modelling and Control of Electromagnetic Vibratory Actuator Applied in Vibratory Conveying Drives, Željko V. Despotović, Aleksandar I. Ribić  
Department of Robotics

### 2.1.4 Pneumatska/hidraulična uzbuda

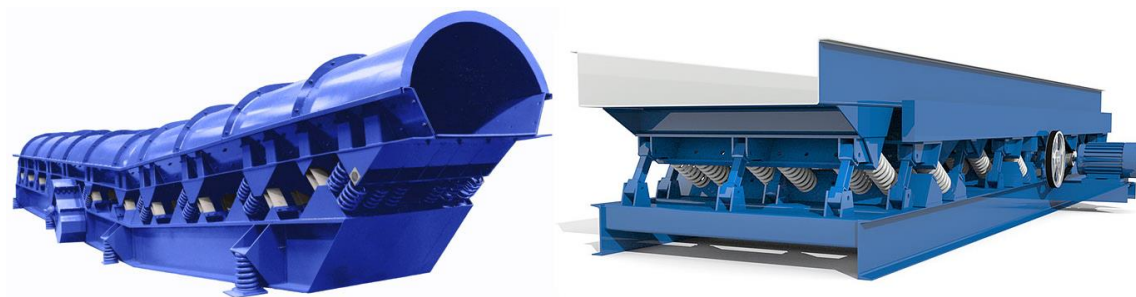
Pneumatski/hidraulični vibracijski konvejeri imaju jednu jedinstvenu prednost, a to je jednostavno podešavanje kuta nagiba ploče. Kao takvi su idealni za izdvajanje materijala iako se često koriste i za doziranje. Pogon ovakvih uređaja je pneumatski/hidraulični cilindar



Slika 10. Pneumatski vibracijski konvejer [26]

## 2.2. Tipovi konvejera i tipovi čestica/proizvoda na konvejeru

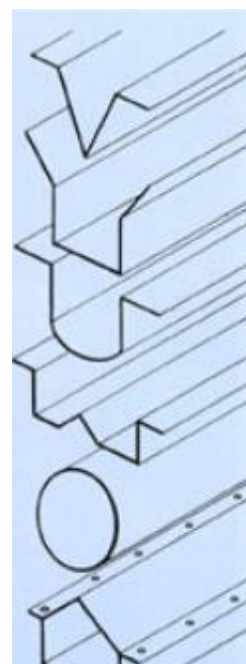
Vibracijske konvejere dijelimo na zatvorene i otvorene, na konvejere sa pravokutnim i oblim otvorom na kraju. Treba napomenuti da postoje i specijalni oblici otvora na kraju konvejera. Zatvoreni tipovi se koriste za transport jako sitnih čestica materijala kako bi se izbjeglo stvaranje prašine da bi se izbjeglo da primjerice operater u blizini stroja inhalira te čestice, što je izuzetno opasno u slučaju transporta pijeska, cementa, stakla.



Slika 11. Zatvoreni (obli) i otvoreni (pravokutni) tip konvejera [21]

Ovisno o materijalu koji se transportira mogu postojati posebni zahtjevi za izvedbu konvejera. Zahtjeve možemo podijeliti na pet osnovnih.

- Osnovni zahtjevi su :
- transport (Conveying) ,
  - odstranjivanje ili ujednačavanje čestica (Screening),
  - sortiranje (Sorting) ,
  - uklanjanje vode (Dewatering),
  - doziranje (Feeding)



Slika 12. Specijalni tipovi otvora [20]





**Slika 13. Prikaz konstrukcijskih izvedbi konvejera**

Oblici i tipovi čestica koje prenose ovakvi tipovi uređaja su razni. Prenose se materijali od sitnih i rahlih, pa do grubih proizvoda. Na slici 14. prikazani su materijali od pijeska, metalnog odtapada, pa do piljevine i na kraju ugljena



**Slika 14. Tipovi čestica na vibracijskim konvejerima [25]**



### 2.3. Tipovi elastičnih elemenata (opruga)

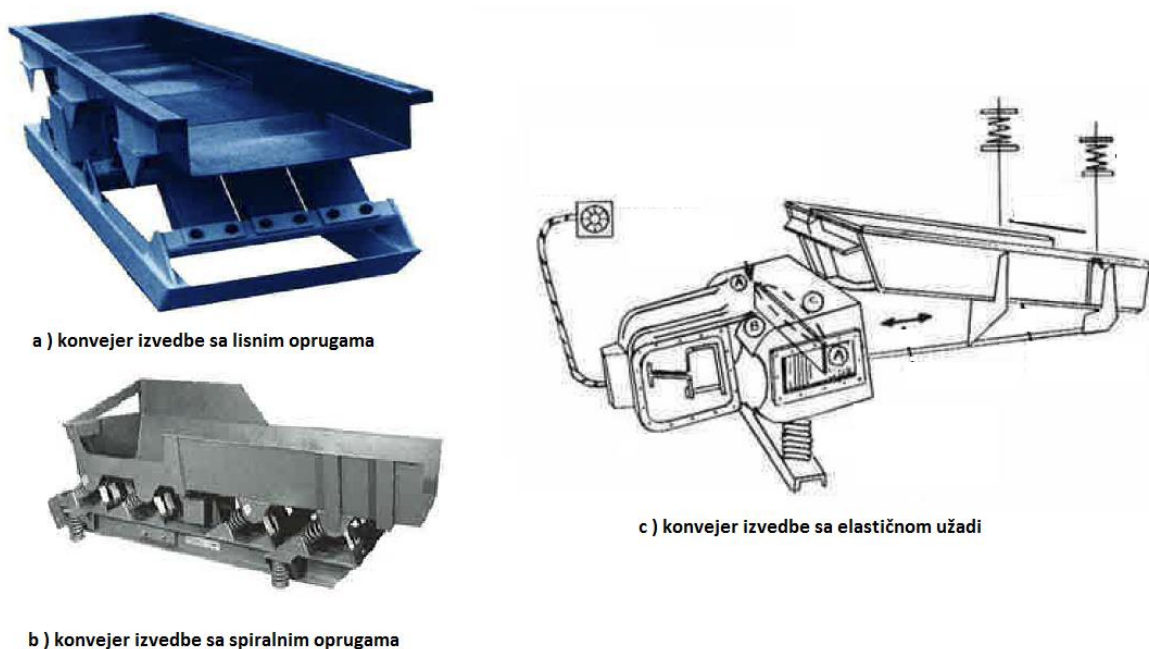
Mehanička opruga je definirana kao elastično tijelo kojem je primarni zadatak da se deformira pod djelovanjem opterećenja i vrati u početni položaj nakon što se ukloni ili prestane opterećenje. Tehnički, funkcija opruge je da transformira potencijalnu energiju u kinetičku i obratno. Elastični element je osnova svakog vibracijskog uređaja.

Kod ovakvih uređaja se uglavnom dva tipa opruga: lisne i standardne spiralne opruge. Prednosti spiralnih opruga je očita, a to je mogućnost velikog pomaka u odnosu na lisne.

Primjerice pri istim volumenima, spiralna opruga može sačuvati više potencijalne energije od lisne. U pravilu lisne opruge su teže od bilo kojeg drugog oblika opruga.

Iako je spiralna opruga u pravilu jeftinija, izvedba uležištenja je u pravilu skuplja od lisne, stoga se kod vibracijskih konvejera vrlo često pribjegava izvedbi konvejera sa lisnim oprugama. Treba napomenuti da je kod izvedbi vibracijskih konvejera sa spiralnim oprugama potreban pivot kako bi definirao smjer kretanja opruge i kako ploča konvejera jednostavno ne bi potonula

Zgodno je napomenuti da postoje izvedbe konvejera koji su obješeni na čelično užadi i gdje cijeli konvejer funkcionira poput fizikalnog njihala.



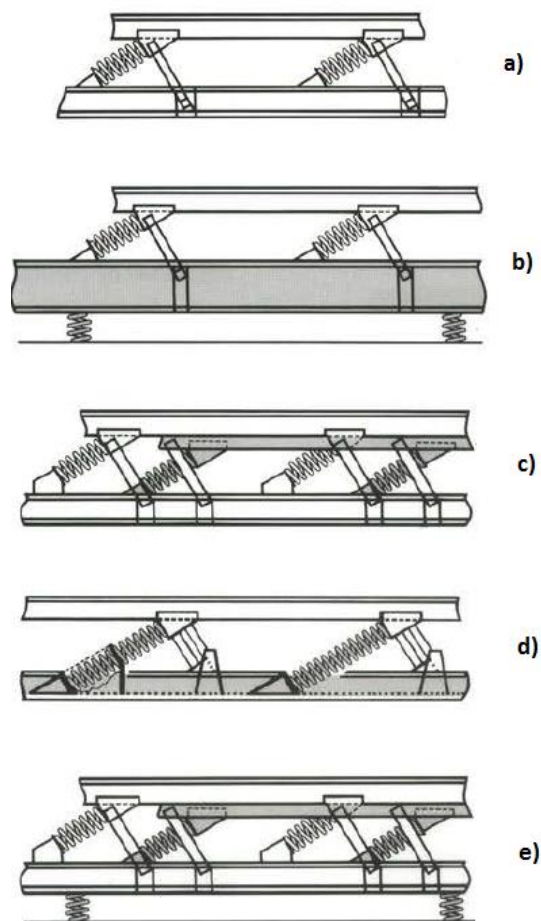
Slika 15. Izvedbe elastičnih elemenata na konvejerima [21]

## 2.4. Tipovi prigušenja vibracija na podlogu

Vibracije koje se s vibracijskih konvejera prenose na podlogu često se ne mogu zanemariti i kao takve zahtijevaju pozornost. Takve pojave je poželjno suzbiti, pogotovo ako je operater u neposrednoj blizini uređaja. Neke od varijanti izolacije uređaja prikazane na slici 16.

Na slici su prikazane osnovne varijante izolacije sustava :

- a) montirano na podlogu – cijela reakcija sustava se prenosi na podlogu
- b) izoliran - sustav je izoliran sa elastičnom podlogom. U praksi reducira prijenos sile na podlogu za 80 do 90 %
- c) balansiran – sustav ima protuuteg koji je u protufazi za pločom konvejera. Reakcija na podlogu je reducirana za 90%
- d) temeljno uzbuđeno uravnoteženje i izolacija - bazna ploča je u protufazi sa pločom konvejera. Reakcija na podlogu je reducirana za 95%
- e) balansirano – izolirano – kombinacija balansiranog i izoliranog prigušenja. Ova kombinacija reducira reakciju na podlogu do 98%



**Slika 16. Tipovi izolacije konvejera [24]**

## 2.5. Kretanja čestica na konvejeru

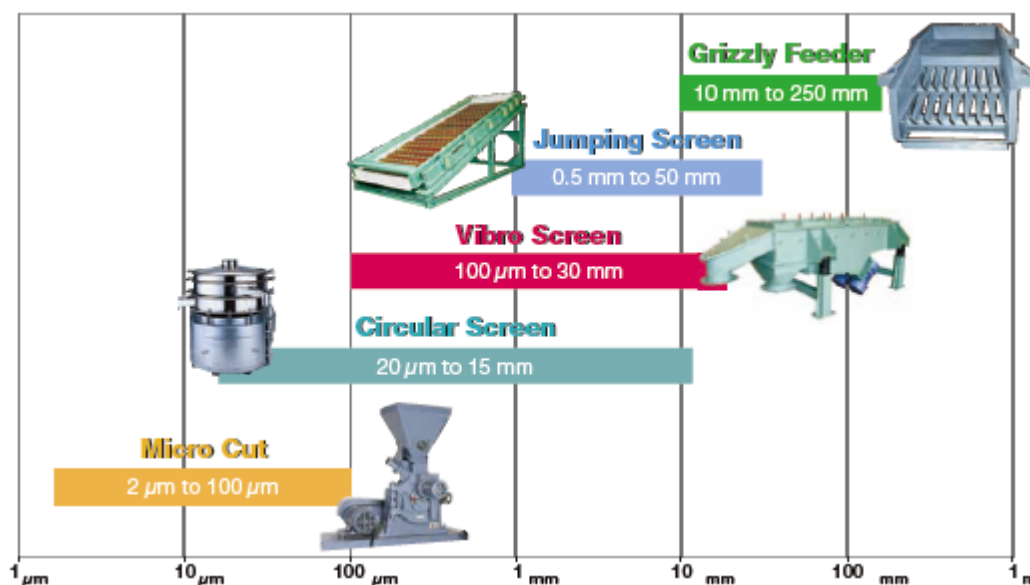
Kretanje čestica je izrazito bitno za vibracijske konvejere. Za razliku od standardnih tračnih konvejera, vibro konvejeri mogu osim transporta, izdvajati nepoželjne čestice, usitnjavati materijal te ga pravilno dozirati.

Na slici 17. možemo primjetiti da su dominantna tri tipa gibanja čestica na ploči konvejera.



Slika 17. Gibanje čestica kod vibro konvejera [21]

Sa slike je vidljivo da je cirkularni tip gibanja dominantan kod rotacijske metode, dok je linearno i eliptično gibanje dominantno kod jednosmjerne metode. Svaki od ovih tipova gibanja je izrazito bitan kod prijenosa čestica ovisno o primjeni. Treba uzeti u obzir da ne postoji idealan tip vibro konvejera. Materijal i transportna brzina definiraju kakav uređaj treba biti (Slika 18.). Recimo jako sitan materijal nije prikladno transportirati na otvorenom tipu konvejera, jer je velika vjerojatnost da će se te čestice raspršiti prostorom u kojem je postavljen konvejer.



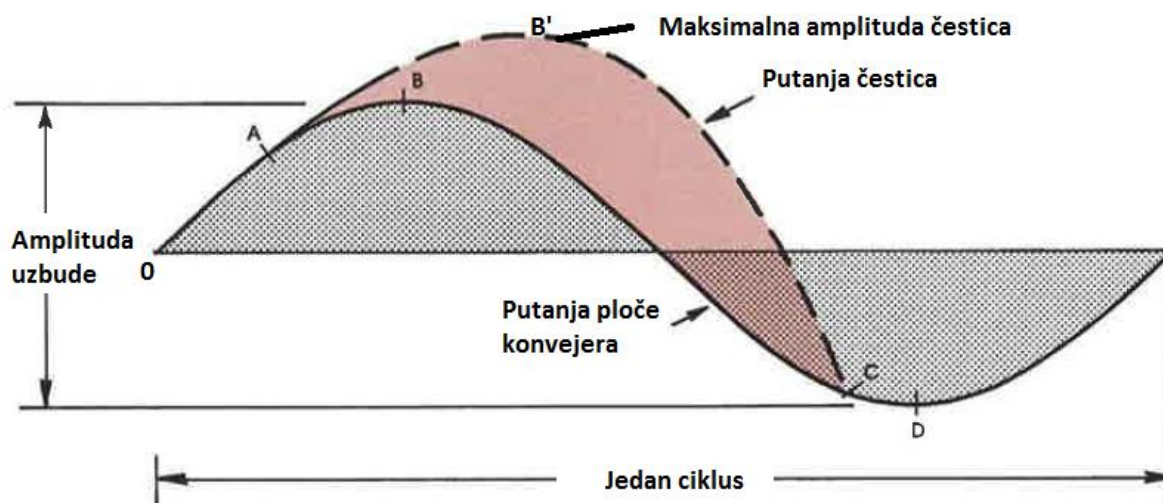
Slika 18. Tipovi konvejera u ovisnosti o veličini dijametra čestice [27]

Ovakvi uređaji služe za transport od jako sitnih čestica ( $2\text{ }\mu\text{m}$ ) do krupnih ( $250\text{ mm}$ ). Veliku pozornost treba obratiti na brzinu čestica, jer iako računamo sa teorijskom brzinom, treba paziti da se prilikom transporta čestice sudaraju jedna s drugom, da postoji trenje podloge i da na same čestice djeluje gravitacija. Stvarna brzina čestica na ploči konvejera je teorijska brzina pomnožena s faktorom redukcije. Vrijednosti faktora redukcije za pojedine materijale se nalaze u Tablici 1.

Vrijednosti faktora redukcije $K_r$ za pojedine tipove materijala			
Lisnato povrće	0,70	Piljevina ili PVC granulat	0,75 – 0,85
Zemlja	0,95	Pijesak	0,70
Sitni komadi ugljena	0,80	Šećer	0,85
Krupni komadi ugljena	0,85	Sol	0,95

**Tablica 1. Vrijednosti faktora  $K_r$  [23]**

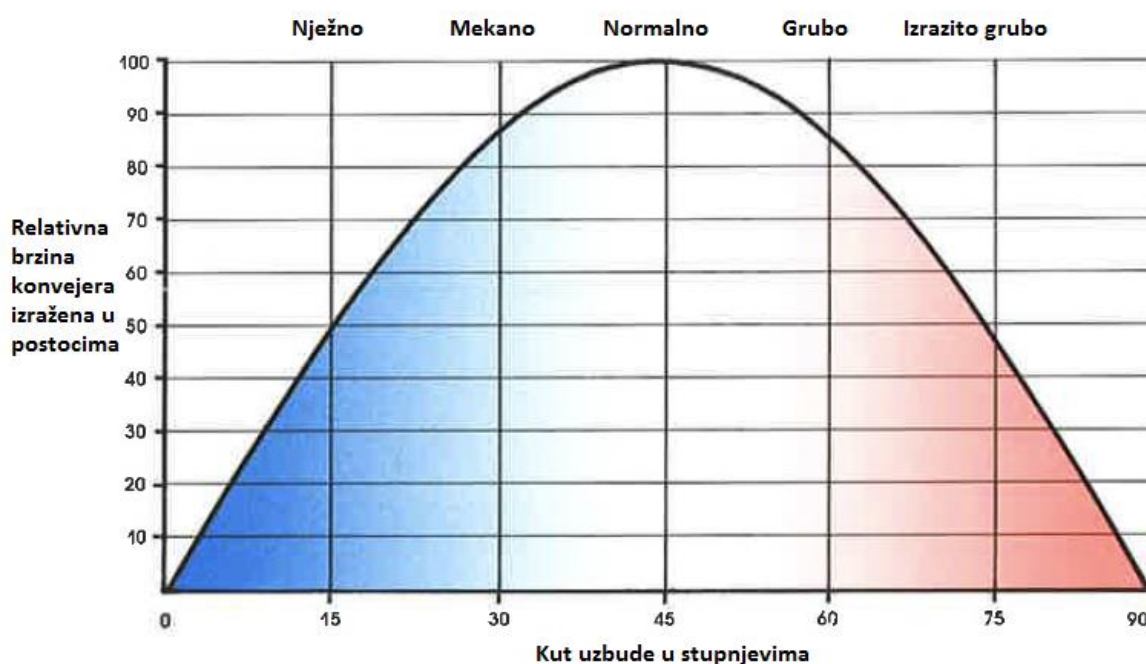
Samo gibanje čestice je definirano kosim hicem te se u pravilu čestica giba po ploči konvejera poput projektila, kao što je prikazano na slici 18. Naime, čestica kreće sa putanjom iz startnog položaja 0 i nastavlja sa putanjom do točke A, u točki B čestica postiže svoju maksimalnu amplitudu čestice te pada u točku C gdje se čestica nakratko smiri dok ne počne novi ciklus. Treba napomenuti da je na slici prikazana uzbuda pod  $45^\circ$ , tj. tip putanje je linearan.



**Slika 19. Putanja čestice i ploče konvejera [21]**

Za brzinu transporta čestica izrazito je bitan i kut uzbude. Naime, brzina transporta čestice u ovisnosti o kutu uzbude definira kako će se čestica gibati. Ovaj parametar je bitan jer, na primjer, ako prenosimo praškasti materijal, nećemo ga transportirati pri velikim brzinama i pri velikim kutom uzbude, to nam primjerice neće biti bitno ako prenosimo na ploči PVC koljena i pokušat ćemo transportirati što većom brzinom (idealno pri kutu od 45%).

Kod materijala koji se sastoji od više raznih čestica, primjerice kod uređaja koji sortiraju sitno narezani otpad, probat ćemo izdvojiti teže od lakših čestica i tu će nam biti poželjniji što veći kut uzbude. Dakako, pod tim kutom ćemo opet imati pad brzine



Slika 20. Brzina transporta čestica u ovisnosti o kutu uzbude [21]

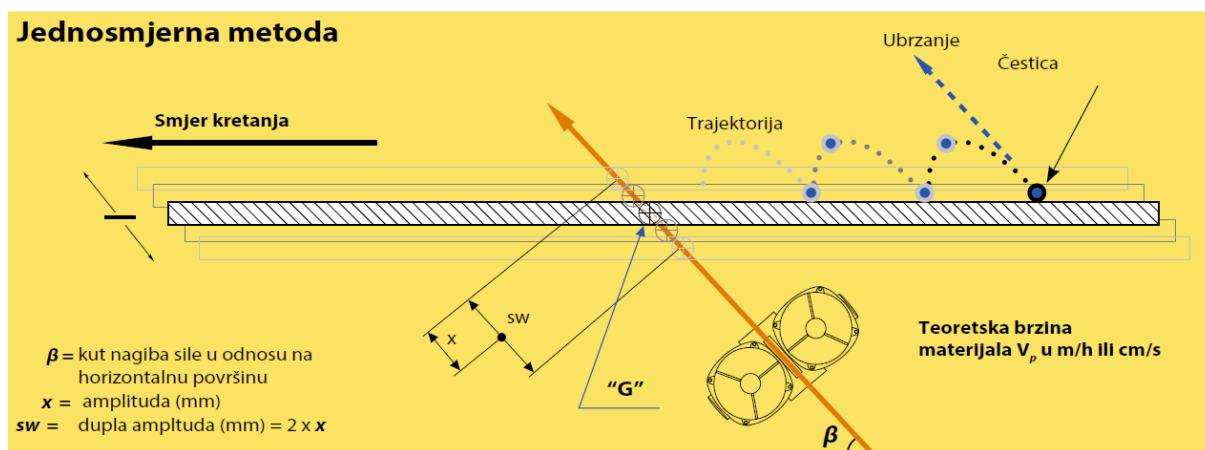
### 3. PRORAČUN

Kako bi se pravilno dimenzionirali svi segmenti uređaja, biti će potrebno je napraviti proračun pojedinih dijelova konstrukcije.

Proračun se sastoji od :

- proračuna dobave materijala
- proračuna ekscentra
- proračuna zupčanika
- odabira pogona
- odabira remenice
- proračuna vratila
- odabira ležaja
- proračuna elastičnih elemenata, amplituda i frekvencija
- proračuna kritičnih spojeva

Biti će potrebno obratiti pažnju na proračun vratila i proračun kritičnih spojeva. Kod ovakvih tipova uređaja djeluju snažne sile i kao takve predstavljaju neposrednu opasnost za okolinu, pogotovo ako je uređaj postavljen u neposrednu blizinu ljudi.



Slika 21. Princip rada vibracijskog konvejera [23]

### 3.1. Proračun dobave materijala

Prvi korak proračuna će biti proračun brzine materijala, kao referentni materijal uzimamo pijesak. S time da uzimamo u obzir maksimalnu i minimalnu protočnu količinu kao granice.

#### 3.1.1 Maksimalna i minimalna teoretska brzina čestica na konvejeru

$$Q = Vp \cdot L \cdot S \quad (1)$$

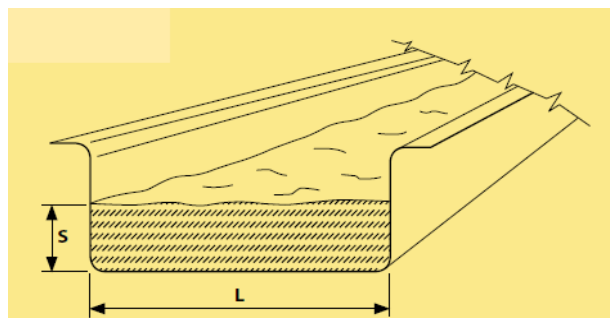
$$Q_1 = 500 \text{ m}^3/\text{h} - \text{maksimalna protočna količina}$$

$$Q_2 = 70 \text{ m}^3/\text{h} - \text{minimalna protočna količina}$$

$Vp$  – teoretska brzina čestica na konvejeru

$L = 1,2 \text{ m}$  - širina ploče konvejera

$S = 0,4 \text{ m}$  - visina materijala na ploči



Slika 22. Ploča konvejera [23]

$$V_{p1} = \frac{Q}{L \cdot S} = \frac{500}{1,2 \cdot 0,4} = 1041,67 \text{ m/h}$$

$$V_{p2} = \frac{Q}{L \cdot S} = \frac{70}{1,2 \cdot 0,4} = 145,83 \text{ m/h}$$

$$V_{p1} = 1041,67 \text{ m/h} ; V_{p1} = 28,94 \text{ cm/s} - \text{maksimalna teorijska brzina proizvoda}$$

$$V_{p2} = 145,83 \text{ m/h} ; V_{p2} = 4,05 \text{ cm/s} - \text{minimalna teorijska brzina proizvoda}$$

### 3.1.2 Maksimalna i minimalna brzina čestica pijeska na konvejeru

Da bi dobili okvirnu masu tereta na ploči konvejera potrebno je odabrati materijal, te izračunati referentnu masu na ploči konvejera.

$$V_p = V_{TEO} \cdot K_r \quad (2)$$

$K_r = 0,7$  - pijesak Prema Tablica 1.

$$\rho_p = 1850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ - gustoća pijeska}$$

$Z = 5 \text{ m}$  – dužina ploče za transport materijala na konvejeru

$$m_{px} = L \cdot Z \cdot S \cdot \rho_p = 5 \cdot 1,2 \cdot 0,4 \cdot 1850 = 4440 \text{ kg} \text{ - masa pijeska na konvejeru}$$

Stvarna brzina čestica pijeska na vibracijskoj ploči

$$V_{PJ1} = V_{p1} \cdot K_r = 1041,67 \cdot 0,7 = 729,17 \frac{\text{m}}{\text{h}} \text{ - maksimalna brzina proizvoda}$$

$$V_{PJ2} = V_{p2} \cdot K_r = 145,83 \cdot 0,7 = 102,08 \frac{\text{m}}{\text{h}} \text{ - minimalna brzina proizvoda}$$

Treba uzeti u obzir da kod transporta oko 50% čestica u zraku [5], a taj faktor ovisi također o drugim čimbenicima, a to su :

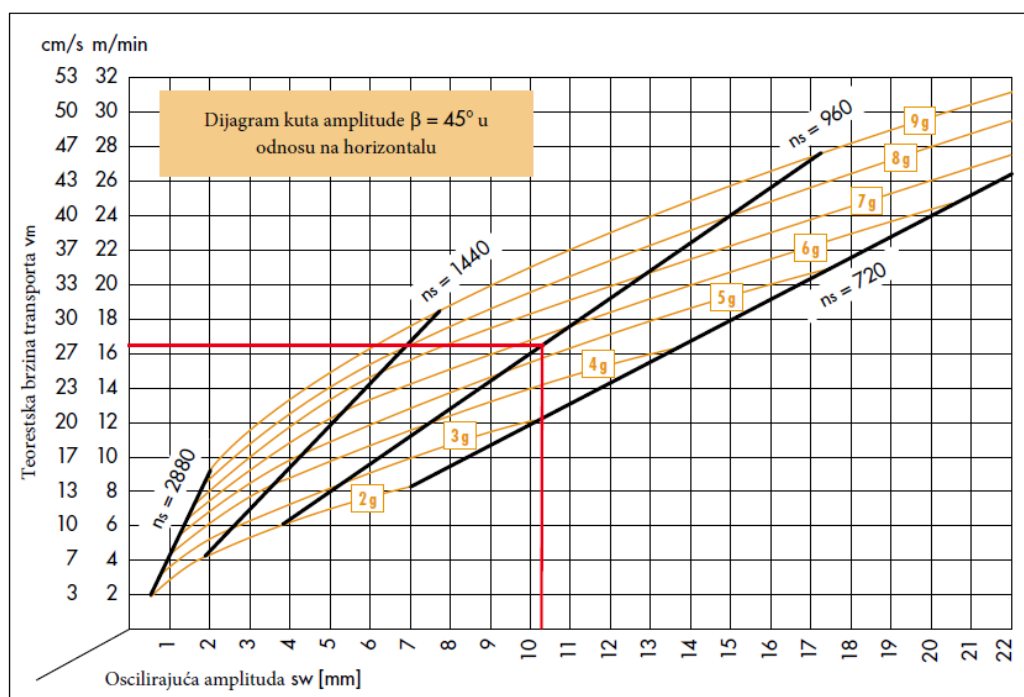
- ploča konvejera je prenatrpana česticama koje se transportiraju
- zalijepljeno dno konvejera sa vlažnim česticama koje se transportiraju
- centrifugalna sila ne prolazi kroz centar gravitacije konvejera
- visoka ljepljivost čestica
- loš raspored težine na konvejeru
- nagli udari na konvejeru

$$m_p = m_{px} \cdot 0,5 = 2220 \text{ kg} \text{ - masa pijeska na konvejeru koja sudjeluje u vibracijama}$$



### 3.2. Proračun ekscentriteta

Potrebno je dimenzionirati ekscentar vibracijskog konvejera, ležajeve, vratila i jedan par zupčanika, te remenice. Orijentacijski ćemo preko teorijske brzine transporta izvući potrebnu duplu amplitudu iz dijagrama (Slika 23.), .



Slika 23. Dijagram brzina – amplituda [5]

Iz dijagrama je vidljivo da neće biti moguće na istoj frekvenciji postići minimalnu i maksimalnu brzinu transporta. To ćemo riješiti tako da ćemo povećati broj okretaja elektromotora . Kao referentnu duplu amplitudu uzimamo  $sw = 11$  mm pri  $n_s = 960$  okr/min

#### 3.2.1 Masa vibracijskog konvejera

Ukupna masa uređaja koji vibrira uz procjenu težine ekscentriteta

$$m_{PL} = 1100 \text{ kg} - \text{masa ploče}$$

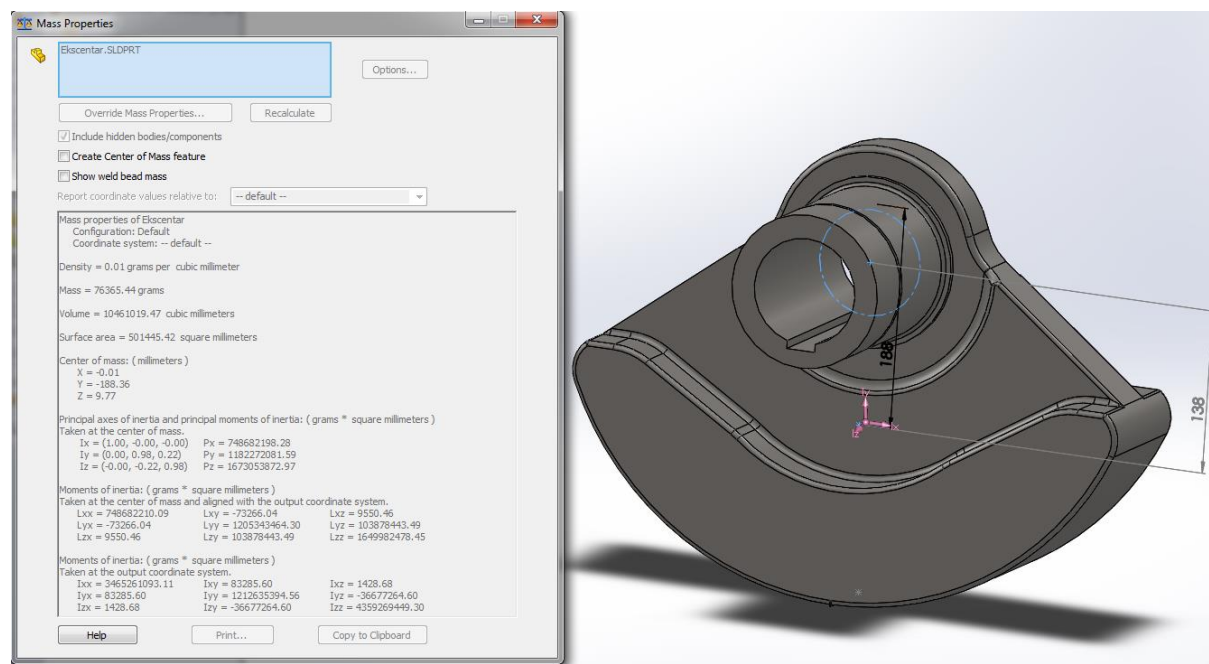
$$m_{EU} = 1000 \text{ kg} - \text{procijenjena masa ekscentriteta}$$

$$m_V = m_{PL} \cdot m_{EU} = 2100 \text{ kg} - \text{ukupna masa segmenata koji vibriraju}$$

$$m_{UV} = m_V + m_P = 2100 + 2220 = 4320 \text{ kg} - \text{ukupna masa koja vibrira}$$

### 3.2.2 Moment na ulazu u vratilo

Moment ćemo odrediti iz uputa da radni stroj postigne radni broj okretaja za 2 sec. Sustav nema elastično oslonjenu temeljnu ploču i kao takav se fiksira direktno sa oprugama na podlogu iz toga proizlazi zašto sustav radi u nadrezonantnom području. Radi toga je bitno da sustav što prije izađe iz rezonantnog područja. Na slici su prikazani dinamički momenti tromosti, masa, površina i volumen ekscentra.



**Slika 24. Ekscentar i raspored momenata tromosti**

Uz pretpostavku konstantnog kutnog ubrzanja

$$\varepsilon = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{100}{2} = 50 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} - \text{potrebno kutno ubrzanje uz vrijeme ubrzanja 2 s}$$

$$J_{zz} = 4,359 \text{ kgm}^2 - \text{dinamički moment tromosti}$$

$$T_D = 2 \cdot J_{zz} \cdot \varepsilon = 2 \cdot 4,359 \cdot 66,66 = 435,9 \text{ Nm} - \text{moment potreban za pokretanje oba ekscentriciteta}$$

Gubici:

$$P_{gz} = \text{ozubljenje cca do 1,5\% prenesene nazivne snage} = 1,5\% (\text{odabrano})$$

$$P_{gL} = \text{kotrljajućih (valjnih) ležaja do 0,5\% prenesene nazivne snage po uležištenom vratliu} \\ = 0,5\% (\text{odabrano})$$

$$P_{gBB} = \text{gubici uslijed bućkanja kod podmazivanja uronjavanjem i brtvenja vratila cca do 5\% od} \\ \text{prenesene nazivne snage} = 5\% (\text{odabrano})$$

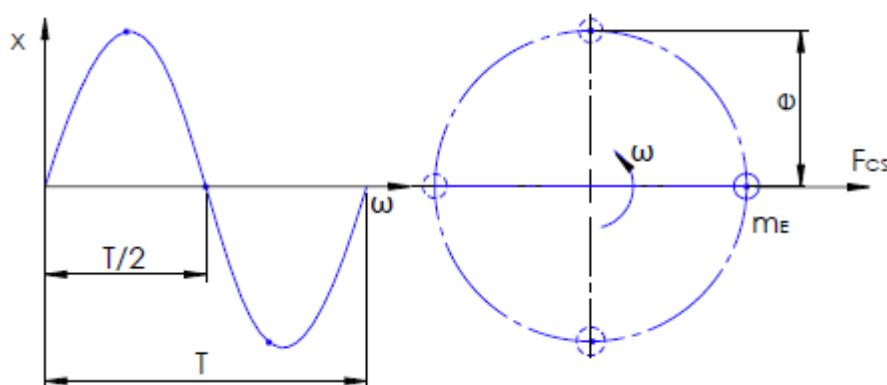
Ukupni gubici od radnog stroja do zupčanika  $z_1$ .

$$P_{guk} = P_{gL} + P_{gBB} + P_{gz} = 0,5 + 5 + 1,5 = 7 \%$$

odnosno

$$\mu'_{uk} = \frac{P}{P \left(1 + \frac{P_{gBB}}{100}\right)} \cdot \frac{P}{P \left(1 + \frac{P_{gL}}{100}\right)} + \dots = \frac{P}{P \left(1 + \frac{P_{guk}}{100}\right)} = \frac{1}{1 \left(1 + \frac{7}{100}\right)} \cong 0,934$$

$$P_t = \frac{T_D \cdot \Omega}{\mu'_{uk}} = \frac{435,9 \cdot 101}{0,934} = 47136,9 \text{ W} - \text{ukupna potrebna snaga na vratilu I}$$



Slika 25. Prikaz mase koja se giba u po pravilu sinusoide

$$sw = \frac{T_E}{m_{UV}} \cdot 10 \quad (3) - \text{kontrolna iskustvena formula za izračun momenta [5]}$$

$$T_E = \frac{sw \cdot m_{UV}}{10} = \frac{11 \cdot 4320}{10} = 4752 \text{ kgcm} = 466,012 \text{ Nm} - \text{moment na vratilu}$$

Možemo primjetiti da su vrijednosti obje formule približno iste.

### 3.2.3 Centrifugalna sila i masa ekscentra

Okomita sila na sutav je centrifugalna sila, nju određujemo preko faktora povećanja koji je u ovom slučaju u nadrezonantnom području  $\eta = 6$ .

$$\eta = 6$$

$$\eta = \frac{\Omega}{\omega} \quad - \text{ bezdimenzijski parametar omjera uzbudne i vlastite kružne frekvencije}$$

$$c \quad - \text{ krutost}$$

$$\omega \quad - \text{ vlastita kružna frekvencija}$$

$$\Omega \quad - \text{ frekvencija uzbude}$$

$$m_{EU} \quad - \text{ ukupna masa ekscentriteta}$$

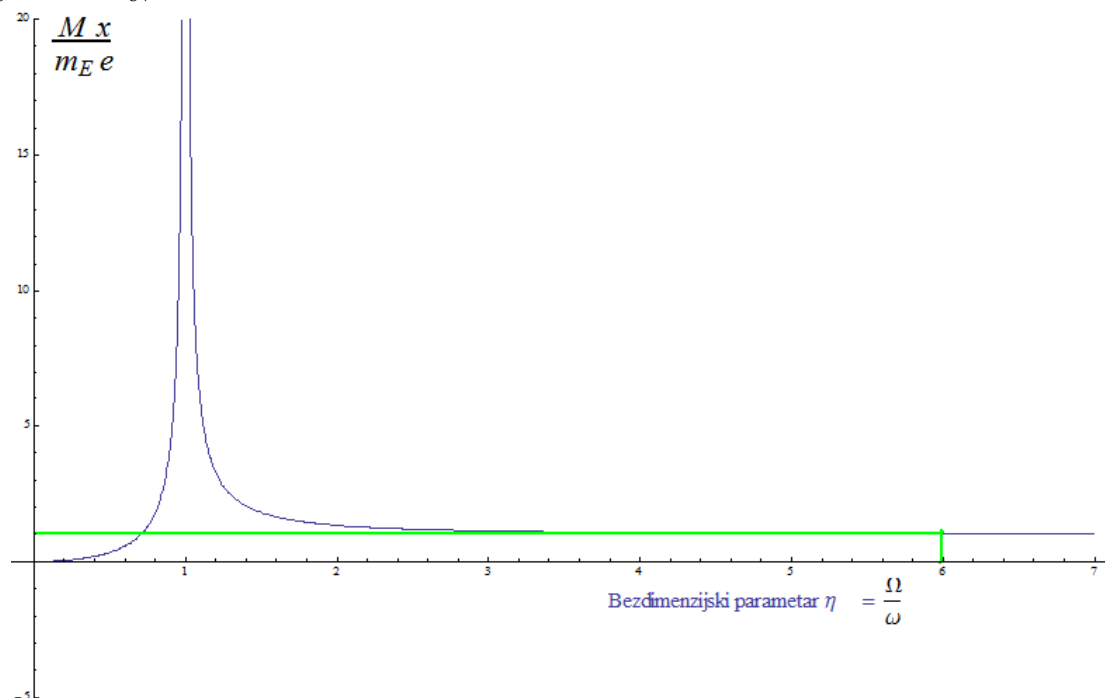
$$\omega^2 = \frac{c}{m}$$

$$x = \frac{m_{EU} \cdot e \cdot \Omega^2}{c - m_{UV} \Omega^2} = \frac{m_{EU} \cdot e \cdot \Omega^2}{c \cdot \left(1 - \frac{m_{UV}}{c} \Omega^2\right)} = \frac{m_{EU} \cdot e \cdot \Omega^2}{m_{UV} \cdot \omega^2 \cdot \left(1 - \frac{1}{\omega^2} \Omega^2\right)} =$$

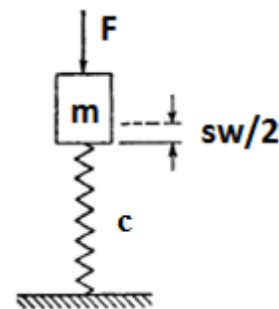
$$x = \frac{m_{EU} \cdot e \cdot \eta^2}{m_{UV} \cdot (1 - \eta^2)}$$

$$\frac{x \cdot m_{UV}}{m_{EU} \cdot e} = \frac{\eta^2}{(1 - \eta^2)} = \left| \frac{6^2}{1 - 6^2} \right| = \left| \frac{36}{-35} \right| = 1,02857 \approx 1$$

$$m_{EU} \cdot e = x \cdot m_{UV} = 0,055 \cdot 4320 = 23,76 \text{ kgm} \quad (3)$$

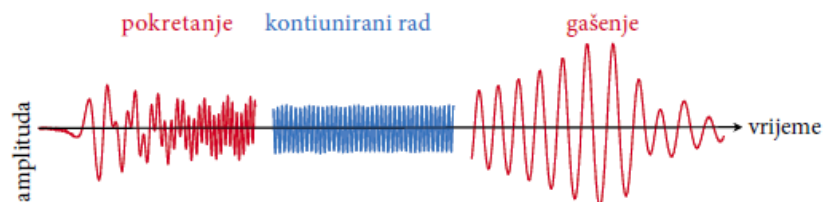


Slika 27. Dijagram funkcija povećanja – bezdimenzijski parametar  $\eta$



Slika 26. Model sustava [16]

Kako sustav prolazi rezonancu, uobičajen je značajan porast amplitude kod uključivanja i isključivanja ovih strojeva



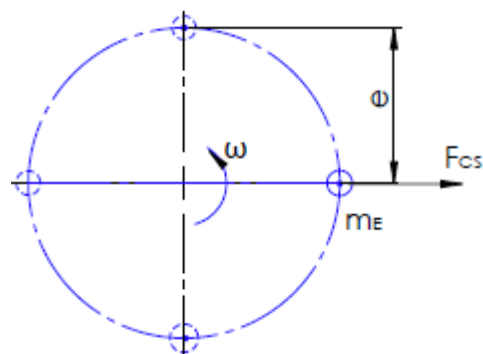
**Slika 28. Uključivanje i isključivanje vibrokonvejera**

Treba uzeti u obzir da imamo ukupnu silu i dvije oscilirajuće mase.

$$F_{CS} = m_{EU} \cdot e \cdot \Omega^2 = 23,76 \cdot 101^2 = 242376 \text{ N} - \text{ukupna potrebna centifugalna sila}$$

$$F_{CS} = 2 \cdot m_E \cdot e \cdot \Omega^2 \quad (4)$$

$$\Omega = 2 \cdot \pi \cdot n_s = 2 \cdot \pi \cdot \frac{960}{60} = 101 \text{ s}^{-1} - \text{kutna brzina}$$



**Slika 29. Centrifugalna sila**

$$m_E = \frac{F_{CS}}{2 \cdot e \cdot \Omega^2} = \frac{242376}{2 \cdot 0,18 \cdot 101^2} = 74,16 \text{ kg} - \text{potrebna oscilirajuća masa kako bi se dobila potrebna sila, treba napomenuti da postoje dvije mase}$$

$$F_{CS} = \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot n_s}{60} \right)^2 \cdot x \cdot m_{UV} \quad (5) - \text{formula za centrifugalnu silu iz uvjeta } m_{EU} \cdot e = x \cdot m_{UV}$$

$$F_{CS} = \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot n_s}{60} \right)^2 \cdot x \cdot m_{UV} = \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot 960}{60} \right)^2 \cdot \frac{0,011}{2} \cdot 4320 = 240130,00 \text{ N}$$

### 3.3. Odabir elastičnih elemenata

Potrebno je odrediti opruge za vibracijsku ploču. Prvo će biti potrebno odrediti krutost, a nakon toga je potrebno odrediti centar težišta sustava. Centar težišta uređaja će se izvući iz programskog paketa SolidWorks.

$c_U$  - ukupna potrebna krutost opruga na sustavu

$c_O$  - krutost pojedine opruge

$\omega$  - vlastita kružna frekvencija sustava

$f_e$  - kružna frekvencija u Hz

$$\eta = 6$$

$$\eta = \frac{\Omega}{\omega} \Rightarrow \omega = \frac{\Omega}{\eta} = \frac{101}{6}$$

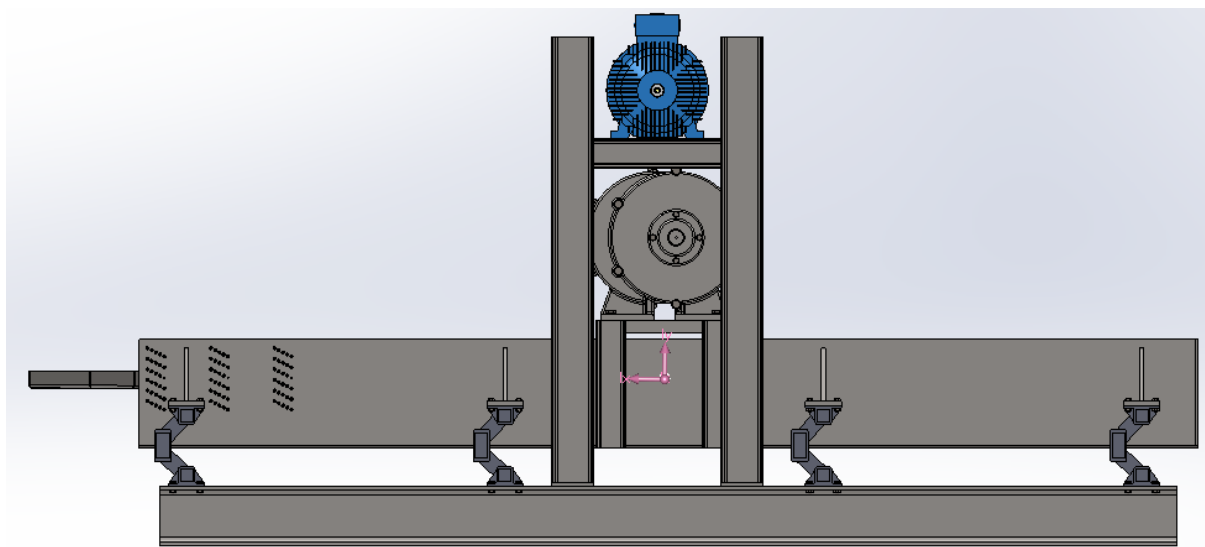
$$\omega = 16,83 \text{ s}^{-1}$$

$$\omega^2 = \frac{c_U}{m_{UV}} \Rightarrow c_U = m_{UV} \cdot \omega^2 = 4320 \cdot 16,83^2$$

$$c_U = 1223640 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

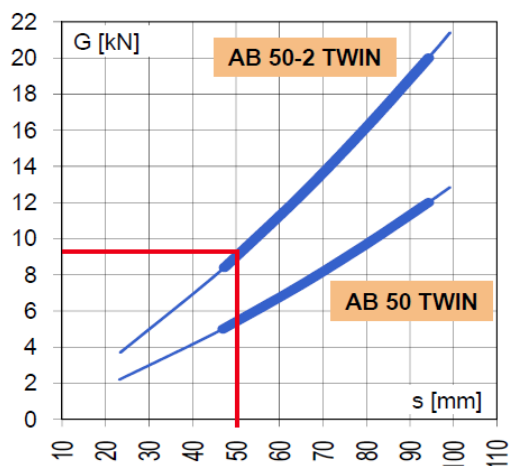
$$c_O = 152955 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$f_e = \frac{\omega}{2 \cdot \pi} = \frac{16,85}{2 \cdot 3,1415} = 2,6785 \text{ Hz}$$



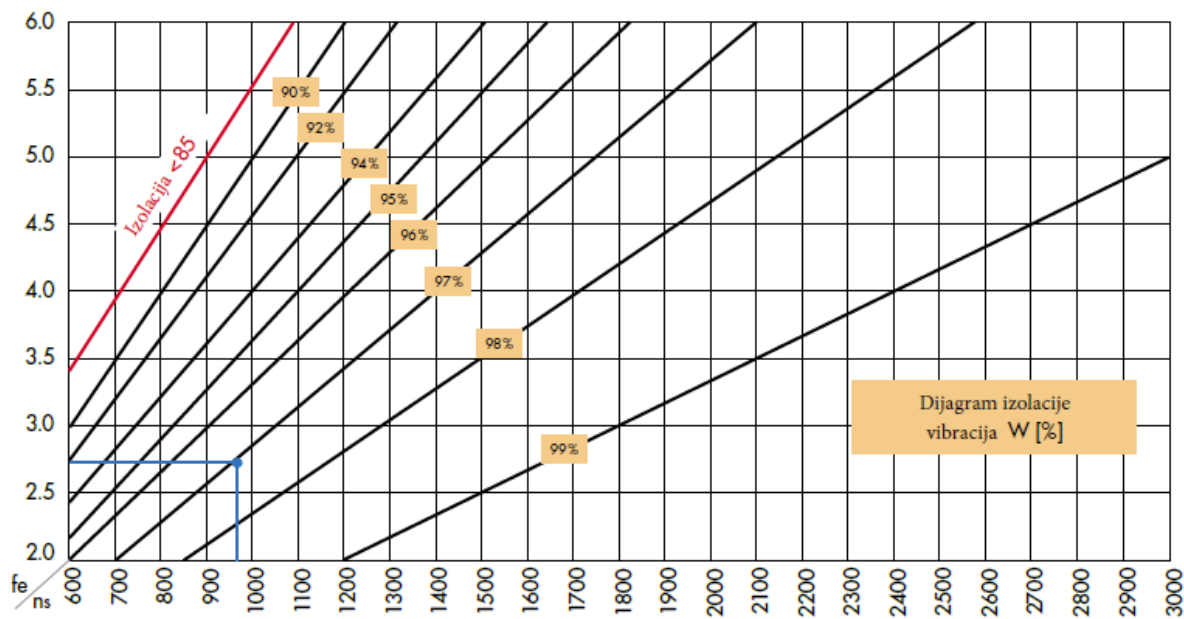
Slika 30. Težište vibracijskog konvejera

Kako je masa uređaja otprilike raspoređena 50%/50% odabiremo opruge potrebnu ukupnu silu dijelimo sa osam opruga, a odabrani tip opruge je Rosta AB 50 -2 TWIN



Slika 31. Karakteristika odabrane opruge

Preostaje iz dijagrama vidjeti udio izolacije na podlogu



Slika 32. Dijagram izolacije vibracija

### 3.4. Proračun zupčanika

Broj zubi oba zupčanika je jednak, stoga je i prijenosni omjer jednak. Zupčanici će imati svrhu da se ekscentriteti okreću u suprotnim smjerovima u odnosu jedan naprema drugom. Zupčanike koristimo jer su izrazito pouzdani što se tiče mehaničkih prijenosnika, imaju visok stupanj iskoristivosti te su relativno jednostavni za održavanje. Koristimo čelnike sa kosim zubima radi većeg stupnja prekrivanja

$$m \geq \sqrt[3]{\frac{2 \cdot T_{1\max} \cdot \cos^2 \beta_z \cdot Y_F \cdot Y_\beta \cdot K_A \cdot K_V}{\left(\frac{b}{d_1}\right) \cdot z_1^2 \cdot \sigma_{Fdop}^2}} \quad (6)$$

$Y_F$  - faktor oblika

$Y_\beta$  - faktor utjecaja kuta nagiba zuba

$K_A$  - faktor udara

$K_V$  - dinamički faktor

$z_1$  - broj zubi prvog zupčanika

$n_{RS}$  - broj okretaja radnog stroja

$n_{EM}$  - broj okretaja elektromotora

Predračunske vrijednosti faktora , za zupčanike je odabran čelik Č5432 cementiran i kaljen.

Prema [9] , str 169

$$Y_F = 2,2; Y_\epsilon = 1; K_{Fa} = 1; \lambda = \frac{b}{m} = 25;$$

$$\sigma_{FP} = \frac{\sigma_{Fim}}{S_F} \cdot S_{\tau_{DN}}; S_F = 1,7; S_{\tau_{DN}} = 0,7; \text{odabrano prema Tablici 28,}$$

$$\sigma_{FP} = \frac{440}{1,7} \cdot 0,7 = 181,18 \text{ N/mm}^2$$

Određivanje maksimalnog okretnog momenta

$$T_1' = T_1 + T_\epsilon'$$

$T_1'$  (Nmm) = moment okretanja zupčanika  $z_1$  ako se uzme u obzir moment ubrzanja masa radnog stroja i svi gubici do zupčanika  $z_1$

$T_1$  (Nmm) = moment okretanja zupčanika  $z_1$  uz sve gubitke od radnog stroja do zupčanika  $z_1$

$T_\epsilon'$  (Nmm) = moment ubrzanja masa radnog stroja



$$T'_\varepsilon = \frac{GD_{redI}^2 \cdot \omega}{4g \cdot t_u} = \frac{GD_{redI}^2 \cdot n_1}{375 \cdot t_u} = \frac{8,273 \cdot 1480}{375 \cdot 2} = 26,034 \text{ Nm}$$

$$T_1 = T_{v1} = 435,9 \text{ Nm}$$

Zagonski momenat radnog stroja reduciran na vratilo I i zupčanka  $z_1$  (radi sigurnosti uzimamo  $50 \text{ Nm}^2$ ):

$$GD_{redI}^2 = GD_{RS}^2 \left( \frac{n_{RS}}{n_{EM}} \right)^2 =$$

$$= 50 \cdot \left( \frac{960}{2360} \right)^2 = 8,273 \text{ Nm}^2$$

$$T'_1 = 435,9 + 26,034 = 461,934 \text{ Nm}$$

Broj zubi za zupčanik uzimamo  $z_1 = z_2 = 23$ .

Omjer dimenzija  $b/d$  uzima se najčešće od 0,6 do 0,8. Odabire se  $b/d = 0,75$ .

Za faktor udara uzimamo vrijednosti teškog opterećenja elektromotora  $K_A = 1,5$

Za vrijednost dinamičkog faktora uzimamo vrijednost  $K_V = 1,3$

Kut nagiba zuba na diobenom krugu odredit će se preko željene vrijednosti stupnja prekrivanja  $\varepsilon_\beta = 2$  u aksijalnom presjeku i omjera dimenzija  $\Phi$ . Odabrana je širina zupčanika  $b = 90 \text{ mm}$

$$\varepsilon_\beta = \frac{\Phi}{\pi} \sin \beta \quad (7)$$

$$\Phi = \frac{b}{m_n} = z_1 \frac{b}{d_1 \cos \beta_z} \quad (8)$$

Sređivanjem formule 7 i 8 dobijamo :

$$\tan \beta = \frac{\pi \cdot \varepsilon_\beta}{z_1 \cdot \left( \frac{b}{d_1} \right)} = \frac{\pi \cdot 2}{23 \cdot 0,75} = 0,3642 \Rightarrow \beta = 20,01^\circ$$

Faktor utjecaja kuta nagiba zuba

$$Y_\beta = 1 - \varepsilon_\beta \frac{\beta_z^\circ}{120^\circ} = 1 - 2 \cdot \frac{20,01}{120} = 0,666 \geq Y_{\beta \min} = 1 - 0,25 \varepsilon_\beta = 0,5 \quad (9)$$

ZADOVOLJAVA

Prema tome je orijentacijski modul:

$$m \geq \sqrt[3]{\frac{2 \cdot T_{\text{imax}} \cdot \cos^2 \beta_z \cdot Y_F \cdot Y_\beta \cdot K_A \cdot K_V}{(b/d_1) \cdot z_1^2 \cdot \sigma_{\text{Fdop}}^2}} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 461934 \cdot 2,2 \cdot 0,633 \cdot 0,8078}{0,75 \cdot 23^2 \cdot 181,18}} 1,5 \cdot 1,3 = 3,106 \text{ mm}$$

Odabrano 4,5 mm, II stupanj prioriteta

Diobeni promjeri zupčanika

$$d_1 = d_2 = z_1 \frac{m_n}{\cos \beta_z} = 23 \cdot \frac{4,5}{\cos 20,01^\circ} = 110,149 \text{ mm}$$

Radijusi fiktivnih zupčanika

$$r_{n1} = r_{n2} = \frac{d_1}{2 \cdot \cos^2 \beta_z} = \frac{110,145}{2 \cdot \cos^2 20,01} = 62,378 \text{ mm}$$

Broj zubi fiktivnih zupčanika

$$z_{n1} = z_{n2} = \frac{z_1}{\cos^2 \beta_z} = \frac{23}{\cos^2 20,01} = 27$$

Faktor pomaka profila

$$x_1 = x_2 = +0,5$$

Čelni kut zahvatne crte

$$\tan \alpha_t = \frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta_z} = \frac{\tan 20^\circ}{\cos 20,01^\circ} = \frac{0,364}{0,8988} = 0,3874 \Rightarrow \alpha_t = 21,176^\circ$$

Kut nagiba boka na temeljnoj kružnici

$$\tan \beta_{b1} = \tan \beta_z \cdot \cos \alpha_t = \tan 20,01^\circ \cdot \cos 21,176^\circ = 0,3396 \Rightarrow \beta_{b1} = 18,757^\circ$$

Pogonski kut zahvatne crte

$$ev \alpha_{tw} = \frac{2 \tan \alpha_n \cdot (x_1 + x_2)}{z_1 + z_2} + ev \alpha_t = \frac{2 \tan 20 \cdot (0,5 + 0,5)}{23 + 23} + ev 21,176^\circ$$

$$ev \alpha_{tw} = 0,0158248 + 0,0178017 = 0,0336265$$

$$\alpha_{tw} = 25,922^\circ$$

Promjeri kinematskih kružnica

$$d_{w1} = d_{w2} = d_1 \frac{\cos \alpha_t}{\cos \alpha_{tw}} = 110,15 \frac{\cos 21,176^\circ}{\cos 25,922^\circ} = 114,21 \text{ mm}$$

Tjemeni promjeri

$$d_{a1} = d_{a2} = d_1 + 2 \cdot m_n + 2 \cdot x_1 \cdot m_n = 110,15 + 2 \cdot 4,5 + 2 \cdot 0,5 \cdot 4,5 = 123,65 \text{ mm}$$

Podnožni promjeri

$$d_{f1} = d_{f2} = d_1 - 2 \cdot m_n - 2 \cdot c + 2 \cdot x_1 \cdot m_n = 110,15 - 2 \cdot 4 - 2 \cdot 0,25 \cdot 4 + 2 \cdot 0,5 \cdot 4 = 103,4 \text{ mm}$$

Čeoni modul

$$m_t = \frac{m_n}{\cos \beta} = \frac{4,5}{\cos 20,01^\circ} = 4,789 \text{ mm}$$

Računski razmak osi

$$a_n = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{110,15 + 110,15}{2} = 110,15 \text{ mm}$$

Razmak osi

$$a = \frac{d_{w1} + d_{w2}}{2} = \frac{114,21 + 114,21}{2} = 114,21 \text{ mm}$$

Postojeća tjemena zračnost

$$c = a - \frac{d_{a1} + d_{f2}}{2} = 114,21 - \frac{123,65 + 103,4}{2} = 0,68 \text{ mm}$$

Najmanja dopuštena tjemena zračnost

$$c_{\min} = 0,12 \cdot m_n = 0,12 \cdot 4,5 = 0,54 \text{ mm}$$

Odabrano skraćivanje glave

$$k_m = a_n + m_n(x_1 + x_2) - a = 110,15 + 4,5 \cdot (0,5 + 0,5) - 114,21 = 0,44$$

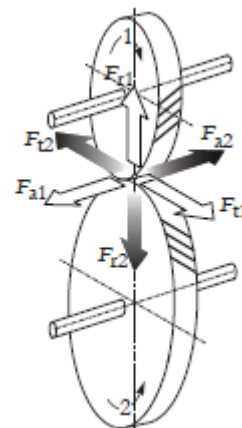
Tjemeni promjer nakon skraćivanja glave

$$d_{ak1} = d_{a1} - 2 \cdot k_m = 123,65 - 2 \cdot 0,44 = 122,77 \text{ mm}$$

Radijusi temeljnih kružnica

$$r_{b1} = r_{b2} = r_1 \cdot \cos \alpha_t = \frac{110,15}{2} \cdot \cos 21,176^\circ = 51,3561 \text{ mm}$$

Stupanj prekrivanja



Slika 33. Zupčanici u zahvatu i raspodjela sila [10]

$$\varepsilon_\alpha = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_n$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\sqrt{\left(\frac{d_{ak1}}{2}\right)^2 - r_{b1}^2}}{\pi \cdot m_t \cdot \cos \alpha_t} = \frac{\sqrt{61,385^2 - 51,356^2}}{\pi \cdot 4,789 \cdot \cos 21,176^\circ} = 2,39749$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\sqrt{\left(\frac{d_{ak2}}{2}\right)^2 - r_{b2}^2}}{\pi \cdot m_t \cdot \cos \alpha_t} = \frac{\sqrt{61,385^2 - 51,356^2}}{\pi \cdot 4,789 \cdot \cos 21,176^\circ} = 2,39749$$

$$\varepsilon_n = \frac{a \cdot \sin \alpha_{tw}}{\pi \cdot m_t \cdot \cos \alpha_t} = \frac{114,21 \cdot \sin 25,922^\circ}{\pi \cdot 4,789 \cdot \cos 21,176^\circ} = 3,55877$$

$$\varepsilon_\alpha = 2,45345 + 2,45345 - 3,55833 = 1,2362$$

Stupanje prekrivanja bočne linije

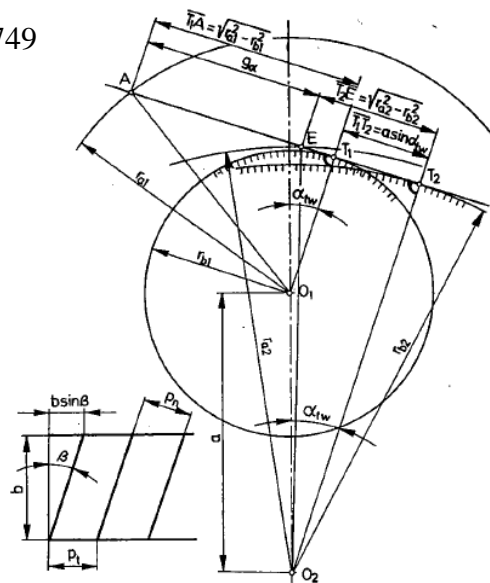
$$b = 0,75 \cdot d_1 = 0,75 \cdot 110,15 = 82,61 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_\beta = \frac{b \cdot \sin \beta}{\pi \cdot m_n} = \frac{90 \cdot \sin 20,01^\circ}{\pi \cdot 4,5} = 2,1784$$

Ukupan stupanj prekrivanja

$$\varepsilon_{uk} = \varepsilon_\alpha + \varepsilon_\beta = 1,34857 + 5,8376 = 7,1861$$

Treba napomenuti da je odabran modul 4.5 kako bi se vratilo i zupčanik mogli izvesti u jednom komadu



Slika 34. Stupanj prekrivanja kod kosih zubi [9]

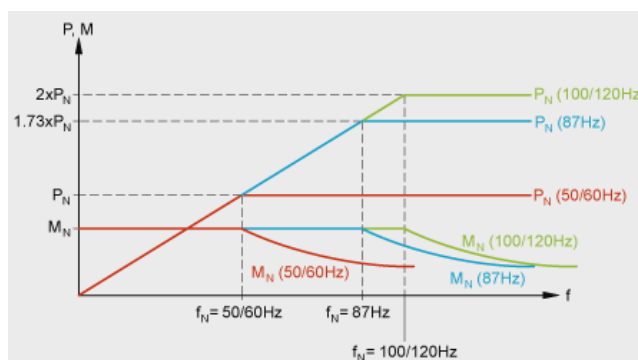
### 3.5. Odabir elektromotora i frekvencijskog pretvarača

Kao bi uređaj mogao raditi potrebno je definirati elektro motor. S obzirom da imamo maksimalnu i minimalnu količinu protoka, potreban je motor sa frekvencijskim pretvaračem. Budući da je riječ o velikim snagama, koristit ćemo frekvencijski pretvarač od proizvođača ABB.

Odabrani elektro motor je **Watt Drive 3BWAG 250S/M04ETHTFSHK2MIPSV**

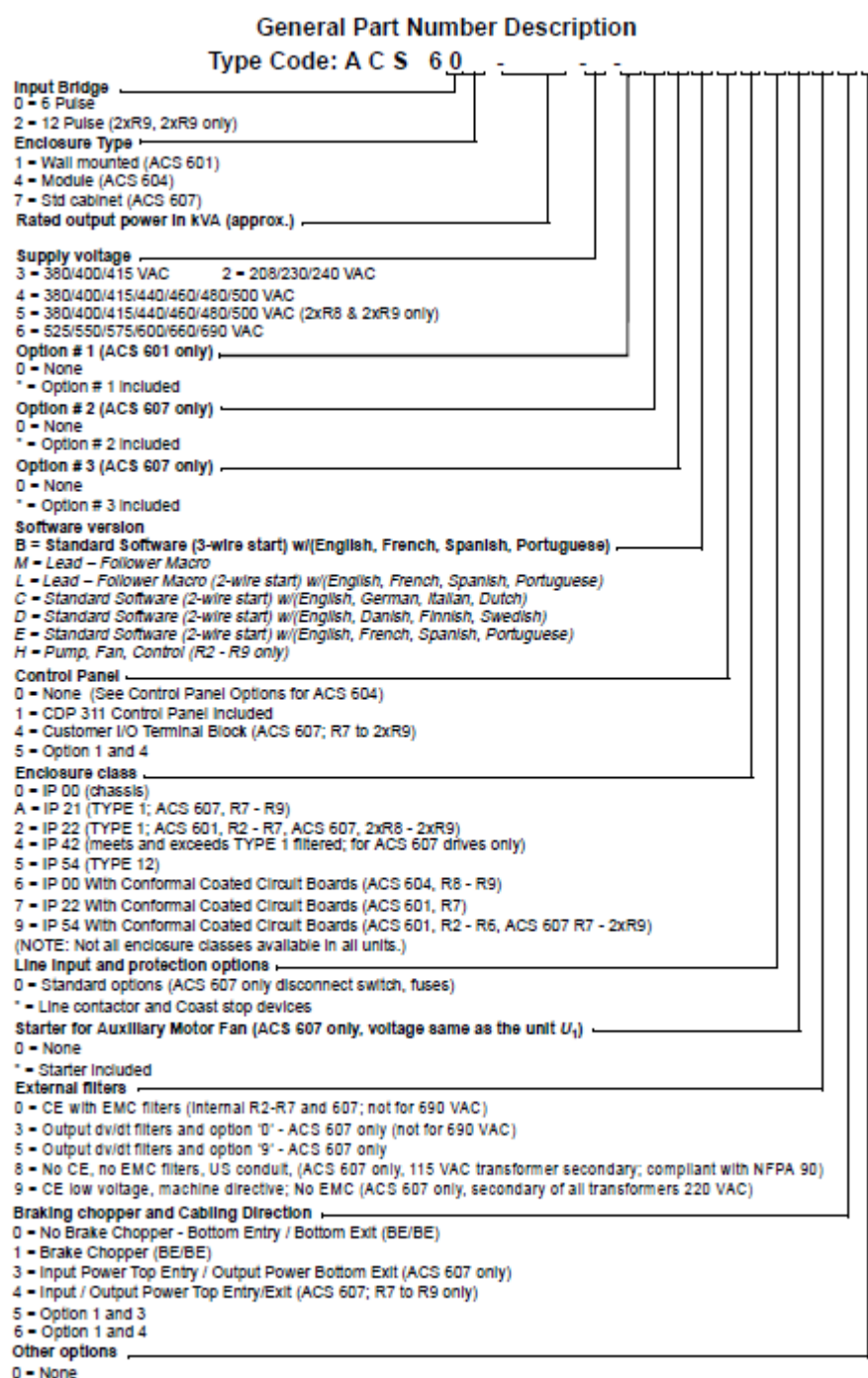
7/7/2015	Data Sheet
<b>Type of motor :</b>	<b>Motor</b>
<b>Type :</b>	<b>3BWAG 225S/M-06E-TH-TF-SH-K2-KB-MIP-IG</b>
<b>Motor data :</b>	
Series :	WEG Modular System Motor (EUSAS)
Housing material :	Grey cast iron
Type :	3BWA
Motor power :	60 [kW]
Rated speed :	2360 [rpm]
Rated torque :	243 [Nm]
Voltage :	440 (only for the use by inverter) [V]
Frequency :	120 (only for the use by inverter) [Hz]
Connection :	DD
Rated current :	101 [A]
Starting to rated current :	Permissible overload current of the frequency inverter
'cos φ' :	0.84
Protection class :	IP 55
Mounting position :	B3
Mounting position of the terminal box :	T - cable entry I
Insulation class :	F
Mass moment of inertia :	$833 \times 10^{-3}$ [kgm <sup>2</sup> ]
Output shaft :	Ø 60 m6 x 140 mm
Keyway :	DIN 6885.1
Painting :	LC4 - Outdoor installation, aggressive atmosphere NDFT 260 µm (C4 - DIN EN ISO 12944-5)
Color :	RAL 5009 (Azure blue)
Weight :	346 [kg]
<b>Further motor executions :</b>	
Fan :	self ventilated
Drain :	KB
Climatic protection :	Increased corrosion protection K2
Temperature controller :	Bimetal switch NCC (TH) and PTC thermistor (TF) for switch off
Anti-condensation heating :	100 Watt
Ball bearing :	220-240V, 50/60Hz
Terminal box execution :	Standard
<b>Data of the encoder :</b>	
Type :	Encoder - IG
Encoder mounting :	outside the fan cover
Description :	Encoder 1024ppr HTL 10-30V with pin connector
cable :	Mating connector with PUR cable 50m

Slika 35. Tehnička specifikacija elektromotora [6]



Slika 36. Karakteristika elektromotora

Odabran je frekvencijski pretvarač ABB ACS 607 – 50 – 4 – 000C4500050



Slika 37. Seleksijska karta frekvencijskog pretvarača [7]

### 3.6. Odabir remenice

Pogon ekscentra će biti povezan sa remenicom i to Poly V remenom radi velikog potrebnog momenta. Potrebno je dimenzionirati i remenice za remen na pogonskom i gonjenom vratilu.

$$n_{EM} = 1480 \text{ min}^{-1}$$

- broj okretaja elektromotora

$$n_{RS} = 960 \text{ min}^{-1}$$

- broj okretaja radnog stroja

$$d_{REM}$$

- diameter remenice na strani elektromotora

$$d_{RRS}$$

- diameter remenice na strani elektromotora radnog stroja

$$ip = \frac{n_{EM}}{n_{RS}} = \frac{2360}{960} = 2,2458$$

$$S_O = 1,05$$

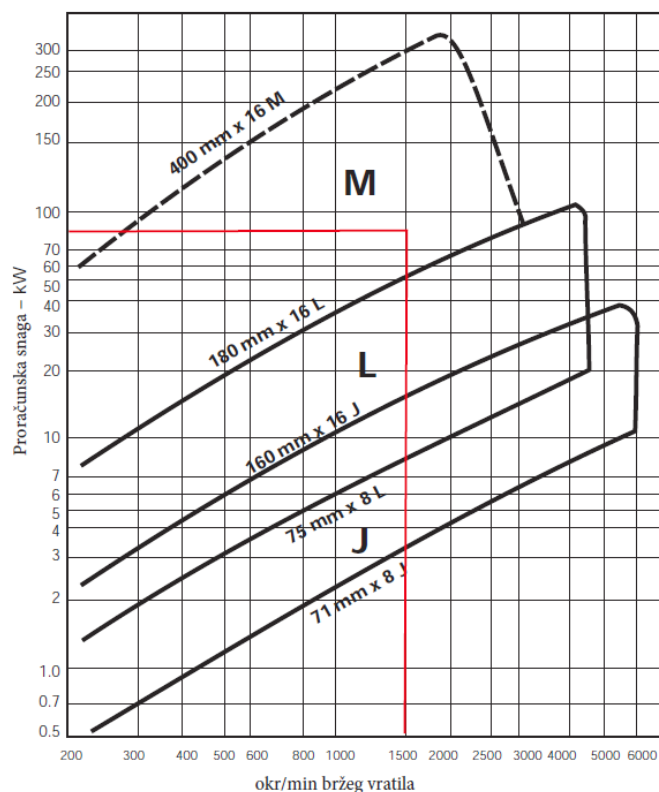
- faktor omjera brzina prema [8], tablica 1, str 155

$$S_F = 1,6$$

- faktor omjera brzina prema [8], tablica 1, str 155

$$P_p = P_t \cdot S_O \cdot S_F = 47136,9 \cdot 1,05 \cdot 1,6 = 79190,1 \text{ kW} \text{ - proračunska snaga remena}$$

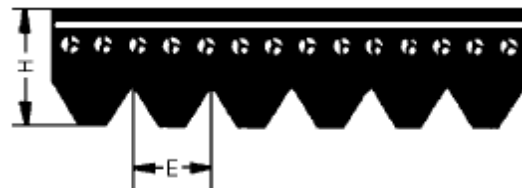
Tablica 2



Tablica 2. Tablica za odabir tipa remena [8]

Odabire se remen Poly V tip PM

Odabir remena	PJ	PK	PL	PM
Razmak rebara E (mm)	2,34	3,56	4,70	9,40
Debljina remena H (mm)	3,5	5,0	7,0	12
Masa/dužina/rebro (g/m/rib)	8,2	19,5	32	110
Maksimalna brzina remena (m/sec)	60	55	50	40
Najmanji promjer remenice (mm)	18	50	70	180



Tablica 3. Poly V remen [8]

Brzina pogonskog vratila okz/min	Preporučena minimalna pogonska remenica (mm)																			
	Proračunska snaga (kW)																			
	0,55	0,75	1,1	1,5	2,2	3,0	4,0	5,5	7,5	11,0	15,0	18,5	22,0	30,0	37,0	45,0	55,0	75,0	93,0	112
720	50	50	67	70	75	85	95	106	118	132	150	160	165	180	190	200	224	250	280	315
960	45	50	56	63	70	75	85	90	100	118	125	132	150	165	180	190	212	224	250	280
1440	40	45	50	63	67	71	80	85	90	100	118	125	132	150	165	170	190	200	224	250
2880	40	45	50	56	63	67	71	75	80	90	95	100	118	125	132	150	160	165	180	190

Tablica 4. Tablica za odabir manje remenice [8]

$$d_{RRS} = i_p \cdot d_{REM} = 2,4583 \cdot 200 = 491,66 \text{ mm} - \text{dijametar vanjske remenice}$$

Odabrano  $d_{RRS} = 500 \text{ mm}$

Procjenjena udaljenost  $L_R = 1.3 \text{ m}$

$$L = 2L_R + \frac{(d_{RRS} - d_{REM})^2}{4 \cdot L_R} + 1,57 \cdot (d_{RRS} - d_{REM}) = 2 \cdot 1,3 + \frac{(0,5 - 0,2)^2}{4 \cdot 1,3} + 1,57 \cdot (0,315 - 0,2)$$

$$L = 3,08831 \text{ m}$$

Odabrano  $L = 3,124 \text{ m}$  – standardni remen prema [8], tablica 3, str 156

Potrebno je odrediti faktore za izračun efektivne udaljenosti od centra pogonske do centra gonjene remenice. Prema [8], str 155.

$$A = \frac{L}{4} - 0,3925 \cdot (d_{REM} + d_{RRS}) = \frac{3,124}{4} - 0,3925 \cdot (0,5 + 0,2) = 0,66325 \text{ m}$$

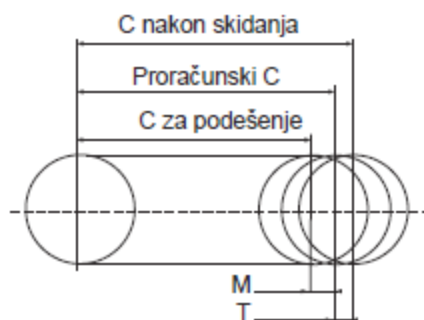
$$B = \frac{(d_{REM} - d_{RRS})^2}{8} = \frac{(0,5 - 0,2)^2}{8} = 0,01125 \text{ m}$$

Efektivna udaljenost od centra do centra iznosi

$$C_R = A + \sqrt{A^2 - B} = 0,6281 + \sqrt{0,6281^2 - 0,00165} = 1,31796 \text{ m}$$

$$\frac{d_{RRS} - d_{REM}}{C_R} = \frac{0,5 - 0,2}{1,31796} = 0,21866$$





Dužina remena (mm)	PJ		PK		PL		PM	
	M	T	M	T	M	T	M	T
< 750	-10	+10	-11	+13	-15	+20		
750 to 1200	-10	+15	-12	+16	-15	+20		
1200 to 2000	-15	+20	-16	+22	-20	+25		
2000 to 3500	-20	+30	-23	+32	-30	+35	-40	+50
3500 to 6000					-40	+50	-50	+70
> 6000							-100	+130

Tablica 5. Tablica podešavanja remena [8]

$$C_{FR} = 0,91$$

- korekcijski faktor udaljenosti remena prema [8], tablica 3, str 156

$$C_{KK} = 0,85$$

- korekcijski faktor kuta kontakta prema [8], tablica 4, str 156

Osnovna snaga remena (kW) za najmanju remenicu (mm) PM Section											Dodatna snaga (kW) po rebru radi prijenosnog omjera				
Okr / min brže vratilo	180	190	200	212	224	250	280	315	355	400	1,00 to 1,04	1,05 to 1,14	1,15 to 1,48	1,49 to 2,00	above 2,01
100	0,63	0,69	0,74	0,81	0,87	1,01	1,18	1,36	1,57	1,81	0	0,01	0,04	0,05	0,07
200	1,19	1,29	1,40	1,52	1,65	1,92	2,23	2,58	2,98	3,45	0	0,03	0,08	0,10	0,14
400	2,22	2,42	2,62	2,86	3,10	3,61	4,20	4,86	5,63	6,50	0,01	0,06	0,16	0,21	0,27
600	3,18	3,47	3,76	4,11	4,46	5,20	6,05	6,99	8,08	9,32	0,02	0,09	0,24	0,31	0,41
720	3,73	4,07	4,42	4,83	5,23	6,11	7,10	8,20	9,47	10,89	0,03	0,11	0,29	0,37	0,49
800	4,08	4,46	4,84	5,29	5,74	6,69	7,77	8,97	10,35	11,88	0,03	0,12	0,32	0,42	0,54
960	4,77	5,22	5,66	6,19	6,71	7,82	9,07	10,45	12,01	13,72	0,03	0,14	0,38	0,50	0,65
1000	4,94	5,40	5,86	6,40	6,94	8,09	9,38	10,80	12,40	14,15	0,04	0,15	0,4	0,52	0,68
1200	5,75	6,28	6,81	7,44	8,06	9,38	10,85	12,44	14,21	16,09	0,04	0,18	0,49	0,63	0,81
1440	6,65	7,27	7,88	8,60	9,30	10,79	12,42	14,15	16,02	17,91	0,05	0,23	0,58	0,75	0,97
1600	7,21	7,87	8,53	9,30	10,05	11,63	13,33	15,11	16,97	18,77	0,06	0,24	0,65	0,84	1,08
1800	7,85	8,57	9,28	10,10	10,90	12,56	14,31	16,09	17,86	19,41	0,07	0,27	0,73	0,94	1,22
2000	8,44	9,20	9,94	10,81	11,64	13,34	15,09	16,79	18,36		0,07	0,31	0,81	1,05	1,35
2200	8,95	9,75	10,52	11,42	12,27	13,97	15,66	17,20			0,08	0,35	0,89	1,15	1,49
2400	9,40	10,22	11,01	11,91	12,77	14,42	15,99	17,29			0,08	0,37	0,97	1,25	1,62
2600	9,78	10,61	11,40	12,30	13,13	14,70	16,08				0,09	0,40	1,05	1,36	1,76
2880	10,17	11,00	11,77	12,62	13,39	14,75					0,11	0,44	1,16	1,46	1,89
3000	10,28	11,10	11,86	12,68	13,41	14,64					0,11	0,46	1,21	1,57	2,03

Tablica 6. Odabir snage po rebru remena [8]

$$P_R = 12,63 \cdot 0,91 \cdot C_{FR} \cdot C_{KK} = 12,63 \cdot 0,91 \cdot 0,85 \cdot 0,75 = 7,3267 \text{ kW} \quad - \text{potrebna snaga po rebru}$$

$$n_R = \frac{P_P}{P_R} = \frac{79,1901}{7,32698} = 11 \quad - \text{potreban broj rebara na remenu}$$

$F_{PR} = 60 \text{ N}$  – sila prednaprezanja na remenu, Prema [8], str 150

$F_{GR} = 360 \text{ N}$  – težina remenice sa silom prednaprezanja

Za pogonsku stranu uzima se remenica sa pripadajućim nastavkom za montažu na vratilo Fenner 200L16 tip 4

Za gonjenu stranu uzima se remenica sa pripadajućim nastavkom za montažu na vratilo Fenner 500L16 tip 10

### 3.7. Proračun vratila

Radi sličnosti i simetrije, vratilo I će biti identično vratilu II

Faktor primjene  $K_A$  (pogonski faktor, faktor udara)

RADNI STROJ	POGONSKI STROJ		
	El. motor Parna turbina Hidromotor	Klipni motori 4-6 cilindara	Klipni motori 1-3 cil.
<u><b>Strojevi s jednakomjernim radom-mali udari</b></u> Turbopuhalo (ventilator) sa $P/n \leq 0,007$ ; centrifugalna pumpa za niskoviskozne fluide; vijčana pumpa (za vodu i slič); strojevi za punjenje boca i slična pakiranja	1	1,25	1,5
<u><b>Strojevi sa srednjim udarima u radu</b></u> Turbopuhalo sa $P/n \leq 0,07$ ; mješalica za beton; građevinarska dizalica; strojevi cestogradnje; turbokompresor; konvejer za rasuti teret; vijčani konvejer; teretni lift; osobni lift; zakretni mehanizam dizalice; mehanizam promjene nagiba dohvatnika dizalice; generator; gen. za zavarivanje; stroj za pranje rublja; glavni pogon alatnog stroja; pumpa naftovoda; ekstruder plastike; aerator vode	1,25 – 1,75	1,5 – 2	2 – 2,25
<u><b>Strojevi s jakim i snažnim udarima u radu</b></u> Turbopuhalo sa $P/n > 0,07$ ; klipni kompresor; konvejer za komadni teret; teška dizala; mehanizam hoda dizalice; mehanizam dizanja tereta kod dizalice; veći gen. za zavarivanje; stroj za hladno gnječenje; preše i čekići za kovanje; preša za probijanje lima; uređaj za bušenje (nafta); klipna pumpa; drobitica kamenja; preša za brikete; mlin sa kuglama; mlin čekićar; vertikalni mlin sa valjcima	1,75 – 2	2 – 2,75	2,5 i više

Tablica 7. Tablica faktora primjene [11]

Moment na ulazu u vratilo

$$K_A = 1,75 \quad - \text{pogonski faktor sa snažnim udarima}$$

$$\eta_R = 0,93 \quad - \text{korisnost kod remenskih prijenosa}$$

$$T_{V1} = \frac{K_A \cdot T_1'}{\eta_R} = \frac{1,75 \cdot 461,934}{0,93} = 869,23 \text{ Nm}$$

Tangencijalna (obodna) sila

$$F_{t1} = \frac{2 \cdot T_{V1}}{d_1} = \frac{2 \cdot 869230}{110,15} = 15782,7 \text{ N}$$

Sila na kinematskoj kružnici

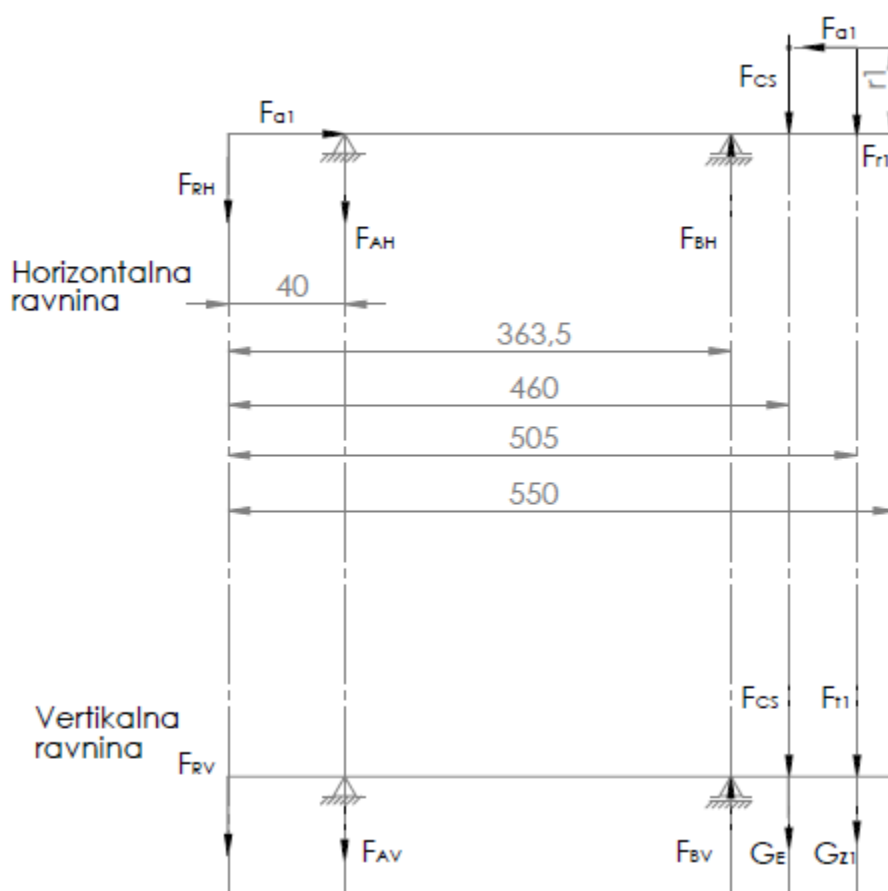
$$F_{w1} = \frac{2 \cdot T_{V1}}{r_{w1}} = \frac{2 \cdot 869230}{114,21} = 15221,6 \text{ N}$$

Radijalna sila

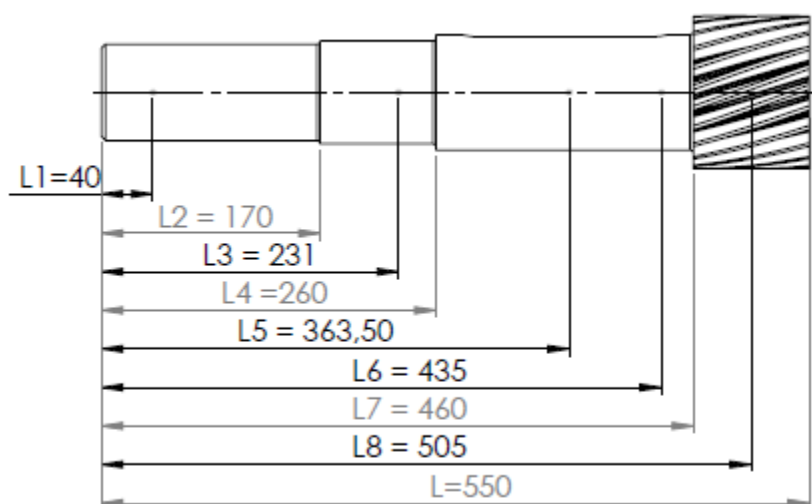
$$F_{r1} = F_{w1} \cdot \tan \alpha_{tw} = 15221,6 \cdot \tan 25,922^\circ = 7398,44 \text{ N}$$

Aksijalna sila

$$F_{a1} = F_{t1} \cdot \tan \beta = 15782,7 \cdot \tan 20,01^\circ = 5747,55 \text{ N}$$



Slika 38. Raspored sila u horizontalnoj i vertikalnoj ravnini na vratilu



Slika 39. Dimenzije vratila i presjeci

Reakcije u osloncima u A i B

$$\sum M_{Bh} = 0: -F_{RH} \cdot (L5 - L1) - F_{AH} \cdot (L5 - L3) + \frac{F_{CS}}{2} \cdot (L6 - L5) + F_{r1} \cdot (L8 - L5) - F_{a1} \cdot \frac{d_1}{2} = 0$$

$$F_{AH} = \frac{\frac{F_{CS}}{2} \cdot (L6 - L5) + F_{r1} \cdot (L8 - L5) - F_{a1} \cdot \frac{d_1}{2} - F_{RH} \cdot (L5 - L1)}{(L5 - L3)}$$

$$F_{AH} = \frac{121188 \cdot (435 - 363,5) + 7398,44 \cdot (505 - 363,5) - 5747,55 \cdot \frac{97,91}{2} - 0 \cdot (363,5 - 40)}{363,5 - 231}$$

$$F_{AH} = 71173,2 \text{ N}$$

Horizontalna komponenta remenice će se zanemariti, jer će veza između radnog stroja i elektromotora biti ostvarena isključivo vertikalnom komponentom.

$$\sum Y_H = 0 \therefore F_{BH} = F_{AH} - F_{r1} + F_{RH} + F_{CS} = 71173,2 - 7398,44 + 0 + 121188$$

$$F_{BH} = 184963 \text{ N}$$

$$\sum M_{BV} = 0: -F_{RV} \cdot (L5 - L1) - F_{AV} \cdot (L5 - L3) + (F_{CS} + G_E) \times (L6 - L5) + (F_{t3} + G_{z1}) \times (L8 - L5) = 0$$

$$F_{AV} = \frac{(F_{CS} + G_E) \times (L6 - L5) + (F_{t1} + G_{z1}) \times (L8 - L5) - F_{RV} \cdot (L5 - L1)}{L5 - L3}$$

$$F_{AV} = \frac{(121188 + 600) \times (435 - 363,5) + (15782,7 + 50) \times (505 - 363,5) - 360 \cdot (363,5 - 40)}{363,5 - 231}$$

$$F_{AV} = 81748,7 \text{ N}$$

$$\sum Y_V = 0; F_{BV} = F_{CS} + G_E + F_{t1} + G_{z1} - F_{RV} + F_{AV}$$

$$F_{BV} = 121188 + 600 + 18193,9 + 50 + 360 + 78113,8$$

$$F_{BV} = 216045 \text{ N}$$

Rezultantne radijalne reakcije u A i B:

$$F_A = \sqrt{F_{AH}^2 + F_{AV}^2} = \sqrt{71173,2^2 + 81748,7^2}$$

$$F_A = 108390 \text{ N}$$

$$F_B = \sqrt{F_{BH}^2 + F_{BV}^2} = \sqrt{184963^2 + 216045^2}$$

$$F_B = 284406 \text{ N}$$

Proračun idealnog oblika vratila

Promjeri vratila u presjecima napregnuti su istovremeno savojno (fleksijski) i uvojno (torzijski). Materijal vratila (5432)

$$\sigma_{fDNdop} = 100 \text{ N/mm}^2 - \text{dopušteno naprezanje na savijanje Prema [2], Tablica 4.2, str 223}$$

Za materijal vratila Č4321 (Prema [11], str 22) slijedi:

$$\sigma_{fDN} = 625 \text{ N/mm}^2; \tau_{tDN} = 375 \text{ N/mm}^2; R_m = 1250 \text{ N/mm}^2$$

$$\alpha_0 = \frac{625}{1,73 \times 375} = 0,9634$$

Presjek 1 ( $x = L1 = 40 \text{ mm}$ )

Definiran remenicom  $d_l = 75 \text{ mm}$

Presjek 2 ( $x = L2 = 170 \text{ mm}$ )

$$M_2 = F_{RV} \cdot x = 360 \times 170 = 61200 \text{ Nmm} \approx 61,20 \text{ Nm}$$

$$M_{red_2} = \sqrt{M_2^2 + 0,75 \times (\alpha_0 \times T)^2} = \sqrt{61,20^2 + 0,75 \cdot (0,9634 \cdot 869,23)^2}$$

$$M_{red_2} = 727,801 \text{ Nm} = 727801 \text{ Nmm}$$

$$d_2 = \sqrt[3]{\frac{10 \times M_{red_2}}{\sigma_{fDNdop}}} = \sqrt[3]{\frac{10 \times 743750}{100}} = 41,75 \text{ mm}$$

Presjek 3 ( $x = L4 = 260 \text{ mm}$ )

$$M_{H3} = F_{AH} (L4 - L3) = 71173,2 \cdot (260 - 231)$$

$$M_{H3} = 2064020 \text{ Nmm} \approx 2064 \text{ Nm}$$

$$M_{V3} = -F_{AV} (L4 - L3) - F_{RV} \times (L4 - L1)$$

$$M_{V3} = 81748,7 (260 - 231) - 360 (260 - 40)$$

$$M_{V3} = 2291510 \text{ Nmm} \approx 2291,51 \text{ Nm}$$

$$M_3 = \sqrt{M_{H3}^2 + M_{V3}^2}$$

$$M_3 = \sqrt{2064^2 + 2291,51^2} = 3084,01 \text{ Nm}$$

$$M_{red3} = \sqrt{M_3^2 + 0,75 \times (\alpha_0 \times T)^2} = \sqrt{3084,01^2 + 0,75 \cdot (0,9634 \cdot 869,23)^2}$$

$$M_{red3} = 3168,13 \text{ Nm} = 3168130 \text{ Nmm}$$

$$d_3 = \sqrt[3]{\frac{10 \times M_{red3}}{\sigma_{fDNdop}}} = \sqrt[3]{\frac{10 \times 3168130}{100}} = 68,1712 \text{ mm}$$

Presjek 4 (B) ( $x = L5 = 363,5 \text{ mm}$ )

$$M_{H4} = F_{AH} (L5 - L3) = 71173 \cdot (363,5 - 231)$$

$$M_{H4} = 9430420 \text{ Nmm} \approx 9430,42 \text{ Nm}$$

$$M_{V4} = -F_{AV} (L5 - L3) - F_{RV} \times (L5 - L1)$$

$$M_{V4} = 81748,7 (363,5 - 231) - 360 (363,5 - 40)$$

$$M_{V4} = 10715200 \text{ Nmm} \approx 10715,2 \text{ Nm}$$

$$M_4 = \sqrt{M_{H4}^2 + M_{V4}^2}$$

$$M_4 = \sqrt{9430,42^2 + 10715,2^2} = 14274 \text{ Nm}$$

$$M_{red4} = \sqrt{M_4^2 + 0,75 \times (\alpha_0 \times T)^2} = \sqrt{14274^2 + 0,75 \cdot (0,9634 \cdot 869,23)^2}$$

$$M_{red4} = 14292,4 \text{ Nm} = 14292400 \text{ Nmm}$$

$$d_4 = \sqrt[3]{\frac{10 \times M_{red4}}{\sigma_{fDNdop}}} = \sqrt[3]{\frac{10 \times 14292400}{100}} = 112,64 \text{ mm}$$

Presjek 5 ( $x = L6 = 435 \text{ mm}$ )

$$M_{H5} = -F_{BH} (L6 - L5) = 184963 \cdot (435 - 363,5)$$

$$M_{H5} = 13224900 \text{ Nmm} \approx 13224,9 \text{ Nm}$$

$$M_{V5} = -F_{BV} (435 - 363,5)$$

$$M_{V5} = 216045 (310 - 250)$$

$$M_{V5} = 12962700 \text{ Nmm} \approx 12962,7 \text{ Nm}$$

$$M_5 = \sqrt{M_{H5}^2 + M_{V5}^2}$$

$$M_5 = \sqrt{13224,9^2 + 12962,7^2} = 18518,4 \text{ Nm}$$

$$M_{red5} = \sqrt{M_5^2 + 0,75 \times (\alpha_0 \times T)^2} = \sqrt{18451^2 + 0,75 \cdot (0,9634 \cdot 869,23)^2}$$

$$M_{red5} = 18465,2 \text{ Nm} = 18465200 \text{ Nmm}$$

$$d_5 = \sqrt[3]{\frac{10 \times M_{red5}}{\sigma_{fDNdop}}} = \sqrt[3]{\frac{10 \times 18465200}{100}} = 122,68 \text{ mm}$$

Presjek 6 ( $x = L7 = 460 \text{ mm}$ )

$$M_{H6} = F_{BH} (L7 - L5) + F_{CS} (L7 - L6) = -184963 \cdot (460 - 363,5) + 121188 \cdot (460 - 435)$$

$$M_{H6} = 14819200 \text{ Nmm} \approx 14819,2 \text{ Nm}$$

$$M_{V6} = -F_{BV} (L7 - L5) + (F_{CS} + G_E) (L7 - L6)$$

$$M_{V6} = 216045 \cdot (460 - 363,5) - (121188 + 600) \cdot (460 - 435)$$

$$M_{V6} = 1780360 \text{ Nmm} \approx 17803,6 \text{ Nm}$$

$$M_6 = \sqrt{M_{H6}^2 + M_{V6}^2}$$

$$M_6 = \sqrt{14819,2^2 + 17803,6^2} = 23164,1 \text{ Nm}$$

$$M_{red6} = \sqrt{M_6^2 + 0,75 \times (\alpha_0 \times T)^2} = \sqrt{23164,1^2 + 0,75 \cdot (0,9634 \cdot 869,23)^2}$$

$$M_{red6} = 19221,5 \text{ Nm} = 19221500 \text{ Nmm}$$

$$d_6 = \sqrt[3]{\frac{10 \times M_{red6}}{\sigma_{fDNdop}}} = \sqrt[3]{\frac{10 \times 19221500}{100}} = 132,34 \text{ mm}$$

## Stupnjevanje vratila - PRETHODNE DIMENZIJE

Presjeci 1:  $d_1 = 75[\text{mm}]$

Presjeci 2:  $d_2 = 80[\text{mm}]$

Presjeci 3:  $d_3 = 90[\text{mm}]$

Presjeci 4,5,6:  $d_4 = 130[\text{mm}]$

### 3.6.1 Odabir ležaja

Ležaj oslonca A

Ležajno mjesto u osloncu A je prema zahtjevu zadatka slobodno, te kao takvo može preuzeti samo opterećenja radijalnim silama. Prema tome izbor ležaja za ovo ležajno mjesto vrši se prema radijalnoj reakciji  $F_A$  i prethodno odabranom promjeru rukavca  $d_1$

$$F_e = F_A = 93404,7[\text{N}]$$

$$d_1 = 80[\text{mm}]$$

$$L_h = 2000[\text{h}] \quad - \text{Prema [2], Tablica 5.12, str 293}$$

$$n_{RS} = 960 [\text{o/min}]$$

$$\varepsilon = 10/3 \quad - \text{za valjkaste ležajeve, Prema [2], str 288}$$

$$V = 1 \quad - \text{ako se unutarnji prsten okreće, Prema [13], str 65}$$

$$Y_1 = 1,9 \quad - \text{prema [12]}$$

$$Y_0 = 2,9 \quad - \text{prema [12]}$$

Ekvivalentno dinamičko opterećenje ležaja

$$F_e = V \cdot F_r + Y_1 \cdot F_a ; \frac{F_a}{F_r} \leq e$$

$$F_e = V \cdot 0,67 \cdot F_r + Y_2 \cdot F_a ; \frac{F_a}{F_r} > e$$

$$F_a = 0 \quad - \text{prema [12]}$$

$$F_e = V \cdot F_r + Y_1 \cdot F_a = 1 \cdot 1 \cdot 108390 + 1,9 \cdot 0$$

$$F_e = 108390 \text{ N}$$

Prema dinamičkoj opterećenosti ležaja i promjeru rukavca  $d_1=80[\text{mm}]$  odabran je valjkasti ležaj 22216 E (dimenzija  $d/D \times B=80/140 \times 33$ ) s dinamičkom nosivosti

$$C = 516000 \text{ N} > F_e = 108390 \text{ N}$$



Ekvivalentno statičko opterećenje ležaja

$$F_s = V \cdot F_r + Y_0 \cdot F_a = 1 \cdot 108390 + 2,9 \cdot 0$$

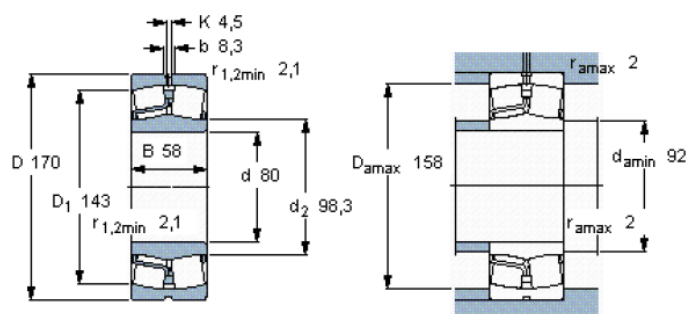
$$F_s = 108390 \text{ N}$$

$$C_0 = 540000 \text{ N} > F_e = 108390 \text{ N}$$



Spherical roller bearings, cylindrical and tapered bore

Principal dimensions			Basic load ratings		Speed ratings	Limiting speed	Designation
d	D	B	dynamic C	static C0	Reference speed		
mm			kN		r/min		* SKF Explorer bearing
80	170	58	516	540	3000	4000	22316 E *



Calculation factors

e 0,35

Y1 1,9

Y2 2,9

Y0 1,8

Slika 40. Odabrani ležaj za ležajno mjesto A[12]

Procijenjeni vijek trajanja ležaja

$$L_h = \left( \frac{C}{F_e} \right)^{\frac{10}{3}} \left( \frac{10^6}{n \cdot 60} \right) = \left( \frac{516000}{108390} \right)^{\frac{10}{3}} \left( \frac{10^6}{n \cdot 60} \right)$$

$$L_h = 5175,25 \text{ sati}$$

## Ležaj oslonca B

Prema zahtjevu zadatka ležajno mjesto u osloncu B mora biti izvedeno kao čvrsto, pa prema tome treba preuzeti slijedeća opterećenja:

Radijalna sila  $F_r = F_B = 284406 \text{ N}$

Aksijalna sila  $F_a = F_{a1} = 5747,55 \text{ N}$

Prethodni promjer rukavca  $d = 130 \text{ mm}$

$L_h = 7500[\text{h}]$  - Prema [2], Tablica 5.12, str 293

$n_{RS} = 960 [\text{o/min}]$

$\varepsilon = 10/3$  - za valjkaste ležajeve, Prema [2], str 288

$V = 1$  - ako se unutarnji prsten okreće, Prema [13], str 65

$Y_1 = 1,9$  - prema [12]

$Y_0 = 2,9$  - prema [12]

Ekvivalentno dinamičko opterećenje ležaja

$$F_e = V \cdot F_r + Y_1 \cdot F_a ; \frac{F_a}{F_r} \leq e$$

$$F_e = V \cdot 0,67 \cdot F_r + Y_2 \cdot F_a ; \frac{F_a}{F_r} > e$$

$$\frac{F_a}{F_r} = \frac{5747,55}{284406} = 0,020209 \quad \text{- prema [12]}$$

$$F_e = V \cdot F_r + Y_1 \cdot F_a = 1 \cdot 1 \cdot 284406 + 1,9 \cdot 5747,55$$

$$F_e = 295326 \text{ N}$$

Prema dinamičkoj opterećenosti ležaja i promjeru rukavca  $d_1 = 130[\text{mm}]$  odabran je valjkasti ležaj 22326 CC (dimenzija  $d/D \times B = 130/280 \times 93$ ) s dinamičkom nosivosti

$$C = 1176000 \text{ N} > F_e = 295326 \text{ N}$$

Ekvivalentno statičko opterećenje ležaja

$$F_s = V \cdot F_r + Y_0 \cdot F_a = 1 \cdot 1 \cdot 260213 + 2,9 \cdot 5747,55$$

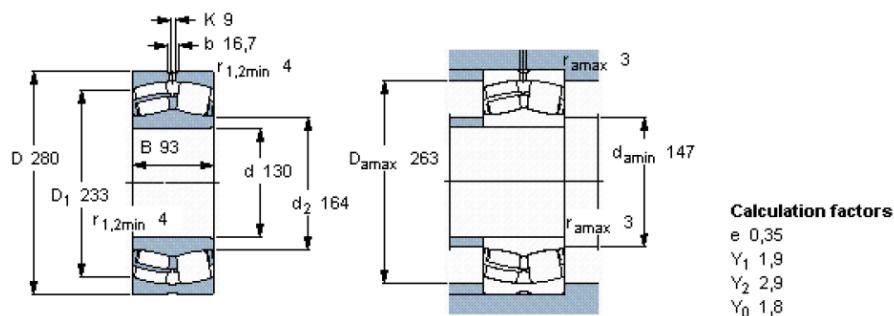
$$F_s = 301074 \text{ N}$$

$$C_0 = 1320000 \text{ N} > F_s = 301074 \text{ N}$$



Spherical roller bearings, cylindrical and tapered bore

Principal dimensions			Basic load ratings		Speed ratings	Limiting speed	Designation
d	D	B	dynamic C	static C0	Reference speed		* SKF Explorer bearing
mm			kN		r/min		-
130	280	93	1176	1320	1800	2400	22326 CC/W33 *



Slika 41. Odabrani ležaj za ležajno mjesto A[12]

Procijenjeni vijek trajanja ležaja

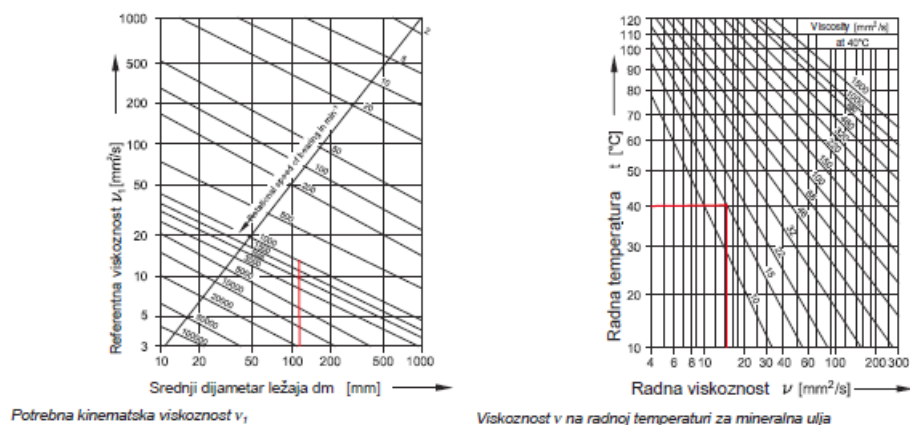
$$L_h = \left( \frac{C}{F_e} \right)^{\frac{10}{3}} \left( \frac{10^6}{n \cdot 60} \right) = \left( \frac{1176000}{295326} \right)^{\frac{10}{3}} \left( \frac{10^6}{n \cdot 60} \right)$$

$$L_h = 2263,48 \text{ sati}$$

Odabrano ulje : **IBC GH 62**

$$d_m = \frac{D_u + D_v}{2} = \frac{80 + 170}{2} \text{ - srednji promjer manjeg ležaja prema [14]}$$

$$d_m = 125 \text{ mm}$$



Slika 42. Dijagram za odabir ulja [14]

### 3.8. Kontrolni proračun dinamičke sigurnosti vratila

Kako bi bili sigurni da je vratilo dobro dimenzionirano, potrebno je napraviti kontrolni proračun. Prvi presjek nam je dimenzioniran, određivanjem presjeka dva vidjet ćemo koliki bi otprilike bio faktor sigurnosti. Na prvom presjeku nam djeluje moment.

Za materijal vratila Č4321 (Prema [11], str 22) slijedi:

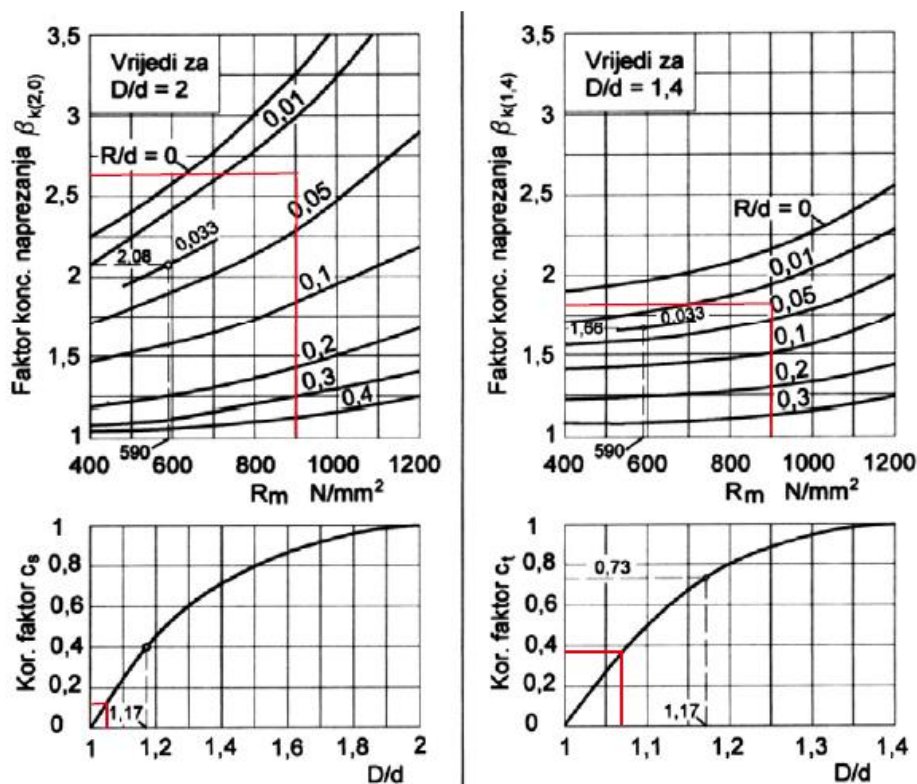
$$\sigma_{fDN} = 450 \text{ N/mm}^2 \quad \tau_{tDN} = 270 \text{ N/mm}^2$$

$$\alpha_0 = \frac{450}{1,73 \times 270} = 0,9634$$

$$\varphi = 1,4 \quad \text{- jaki udari prema [11], str 10}$$

$$S_{pot} = 1,5$$

Presjek 2 ( $x = L_2 = 170 \text{ mm}$ ,  $D = 80 \text{ mm}$ ,  $d = 75 \text{ mm}$ ,  $\rho = 2,5 \text{ mm}$ )



Slika 43. Odabrane vrijednosti  $\beta_{kt}$  i  $\beta_{kf}$  za presjek 2

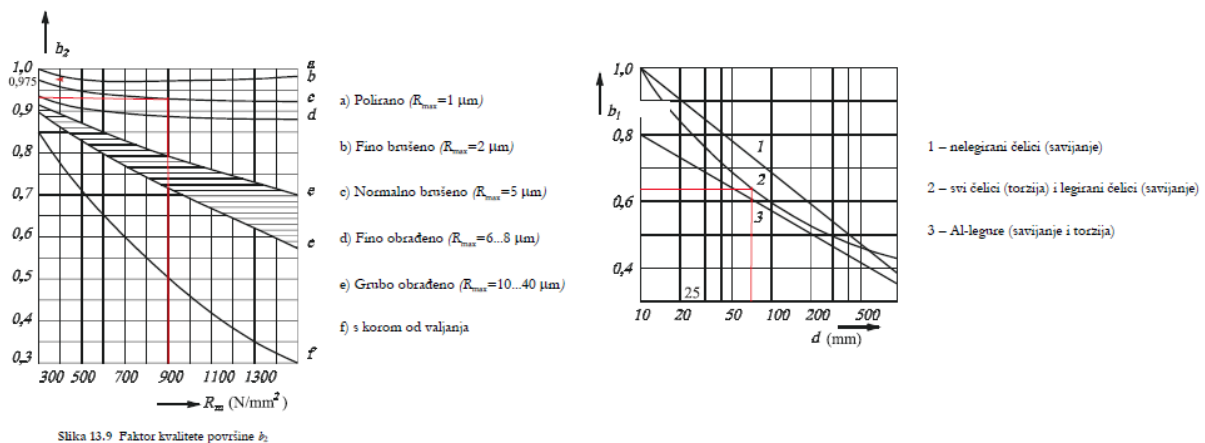
$$\beta_{kf} = 1 + C_1 \times (\beta_{kf2} - 1) = 1 + 0,1 \times (2,6 - 1) = 1,16$$

$$\beta_{kt} = 1 + C_2 \times (\beta_{kt1,4} - 1) = 1 + 0,3 \times (1,7 - 1) = 1,21$$

$$M_2 = F_{RV} \cdot x = 360 \times 170 = 61200 \text{ Nmm} \approx 61,20 \text{ Nm}$$

$$M_{red_2} = \sqrt{(M_2 \times \beta_{kf})^2 + 0,75 \times (\alpha_0 \times T \times \beta_{kt})^2} = \sqrt{(61,20 \times 1,16)^2 + 0,75 \times (0,9634 \cdot 890,68 \cdot 1,21)^2}$$

$$M_{red_2} = 901,97 \text{ Nm} = 901973 \text{ Nmm}$$



**Slika 44. Faktori površine i strojnog dijela za presjek 2**

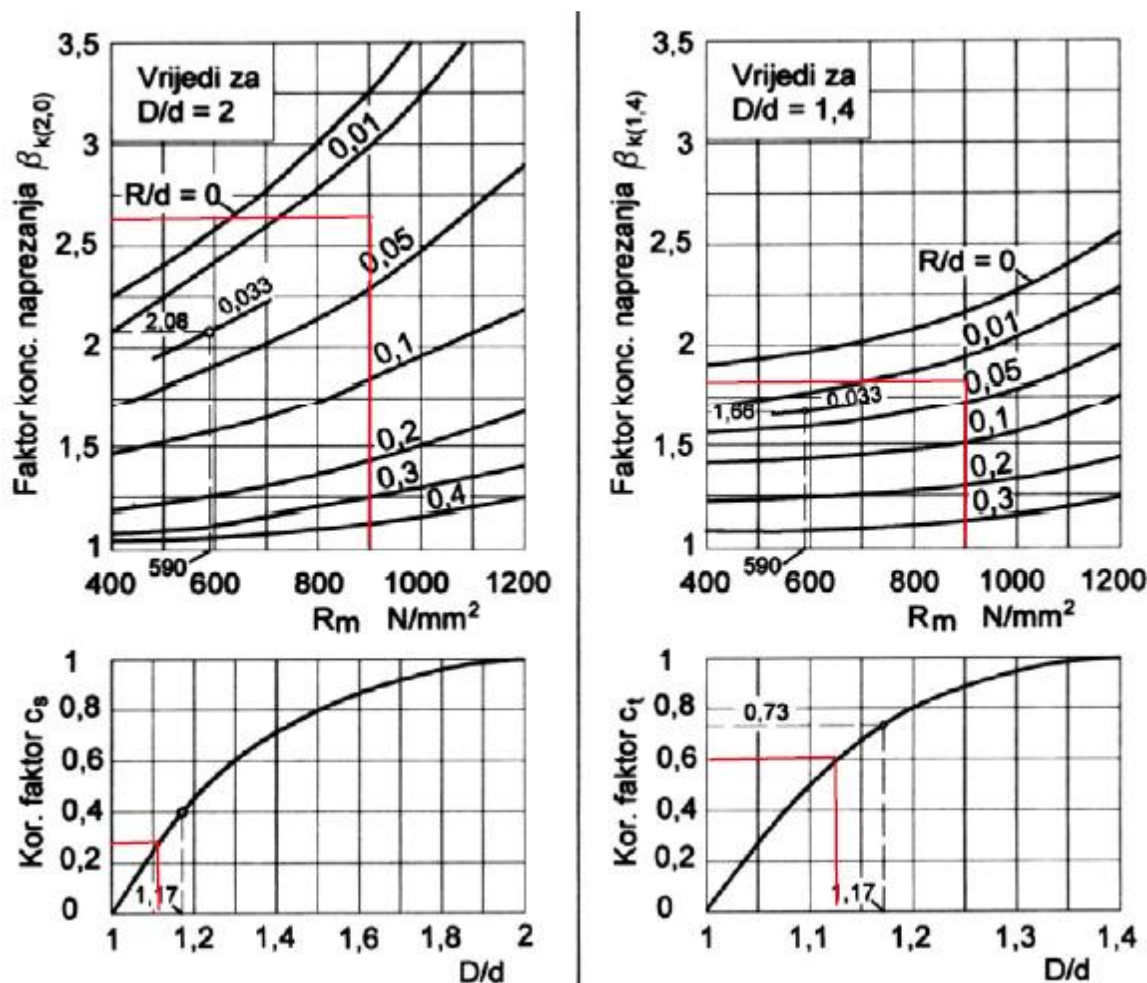
$$W_2 = \frac{\pi \times d_2^3}{32} \cong 0,1 \times d_2^3 = 0,1 \times 75^3 = 42187,50 \text{ mm}^3 \quad - \text{ aksijalni moment otpora}$$

$$\sigma_{f2} = \frac{M_{red2}}{W_2} = \frac{901973}{42187,50} = 21,38 \text{ N/mm}^2 \quad - \text{ postojeće naprezanje}$$

$$S_{post_2} = \frac{b_1 \times b_2 \times \sigma_{fDN}}{\varphi \times \beta_{kf} \times \sigma_{f2}} = \frac{0,63 \times 0,92 \times 635}{1,4 \times 1,16 \times 21,38}$$

$$S_{post_2} \geq S_{potr} = 10,6 > 1,5$$

Presjek 3 ( $x = L4 = 260$  mm,  $D = 90$  mm,  $d = 80$  mm,  $\rho = 2,5$  mm)



Slika 45. Odabrane vrijednosti  $\beta_{kt}$  i  $\beta_{kf}$  za presjek 3

$$\beta_{kf} = 1 + C_1 \times (\beta_{kf2} - 1) = 1 + 0,28 \times (2,6 - 1) = 1,448$$

$$\beta_{kt} = 1 + C_2 \times (\beta_{kt1,4} - 1) = 1 + 0,6 \times (1,7 - 1) = 1,42$$

$$M_{H3} = F_{AH} (L4 - L3) = 71173,2 \cdot (260 - 231)$$

$$M_{H3} = 2064020 \text{ Nmm} \approx 2064,02 \text{ Nm}$$

$$M_{V3} = -F_{AV} (L4 - L3) - F_{RV} \times (L4 - L1)$$

$$M_{V3} = 81748,7 (260 - 231) - 360 (260 - 40)$$

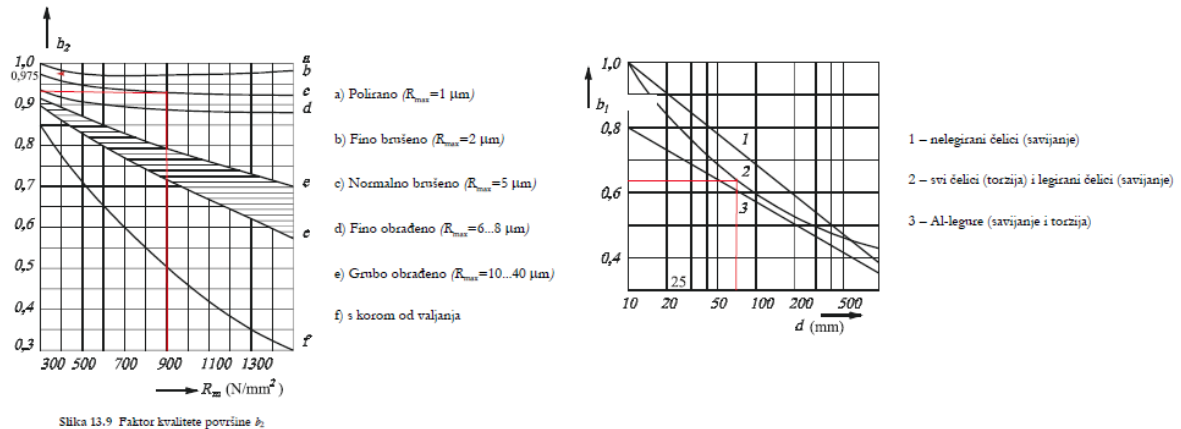
$$M_{V3} = 2291510 \text{ Nmm} \approx 2291,51 \text{ Nm}$$

$$M_3 = \sqrt{M_{H3}^2 + M_{V3}^2}$$

$$M_3 = \sqrt{2064,02^2 + 2291,51^2} = 3084,02 \text{ Nm}$$

$$M_{red3} = \sqrt{(M_3 \times \beta_{kf})^2 + 0,75 \times (\alpha_0 \times T \times \beta_{kt})^2} = \sqrt{(3084,02 \times 1,448)^2 + 0,75 \cdot (0,9634 \cdot 869,23 \cdot 1,42)^2}$$

$$M_{red3} = 4582,87 \text{ Nm} = 4582870 \text{ Nmm}$$



Slika 46. Faktori površine i strojnog dijela za presjek 3

$$W_3 = \frac{\pi \times d_3^3}{32} \cong 0,1 \times d_3^3 = 0,1 \times 80^3 = 51200 \text{ mm}^3$$

- aksijalni moment otpora

$$\sigma_{f3} = \frac{M_{red3}}{W_3} = \frac{4582780}{51200} = 89,51 \text{ N/mm}^2$$

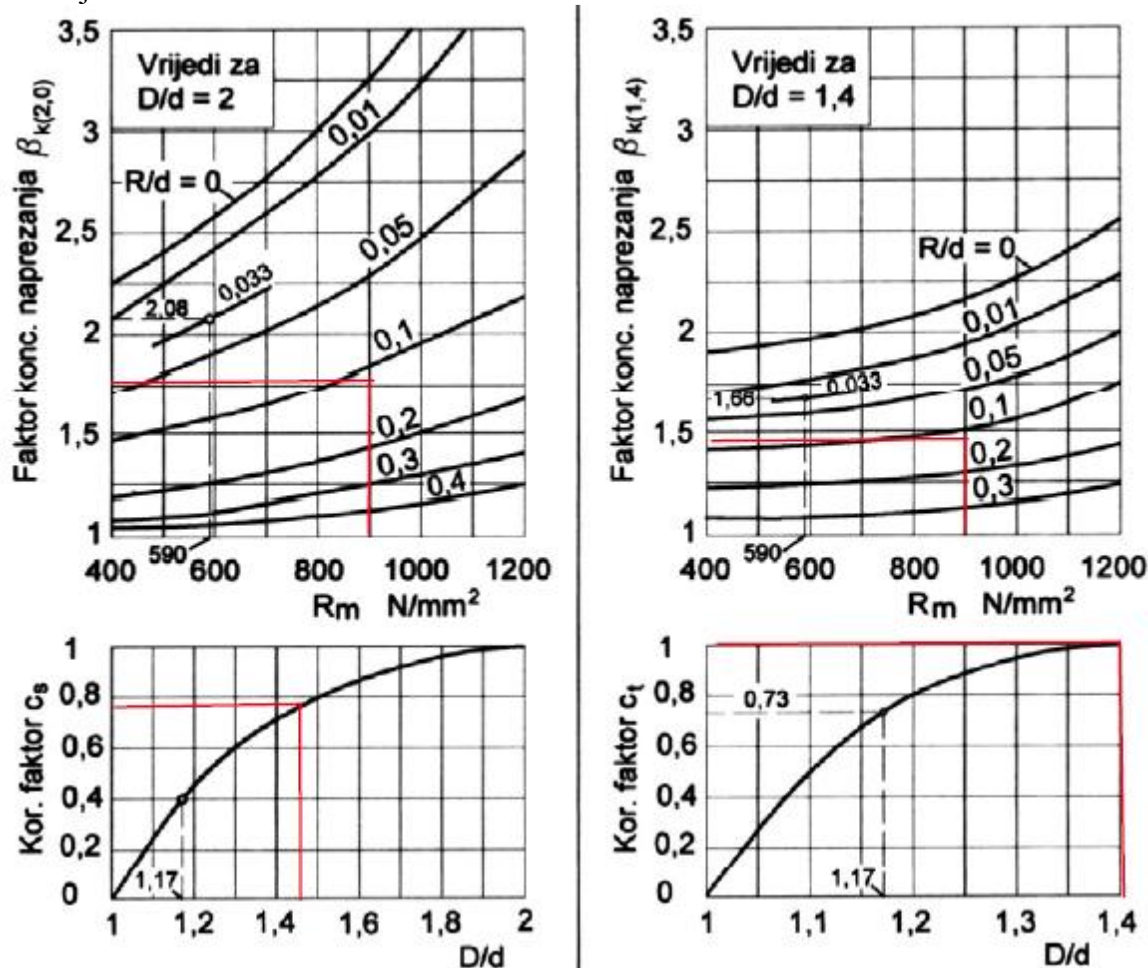
- postojeće naprezanje

$$S_{post3} = \frac{b_1 \times b_2 \times \sigma_{fDN}}{\varphi \times \beta_{kf} \times \sigma_{f3}} = \frac{0,62 \times 0,92 \times 625}{1,4 \times 1,16 \times 89,51}$$

$$S_{post3} \geq S_{potr} = 2,452 > 1,5$$

Presjek 6 ( $x = L7 = 460$  mm,  $D = 130$  mm,  $d = 90$  mm,  $\rho = 10$  mm)

Za presjek 4 i 5 se uzima debljina materijala za presjek 6. Na presjeku 6 je najveće opterećenje.



Slika 47. Odabrane vrijednosti  $\beta_{kt}$  i  $\beta_{kf}$  za presjek 4,5,6

$$\beta_{kf} = 1 + C_1 \times (\beta_{kf2} - 1) = 1 + 0,75 \times (1,7 - 1) = 1,525$$

$$\beta_{kt} = 1 + C_2 \times (\beta_{kt1,4} - 1) = 1 + 1 \times (1,3 - 1) = 1,3$$

$$M_{H6} = -F_{BH} (L7 - L5) + F_{CS} (L7 - L6) = -184963 \cdot (460 - 363,5) + 121188 \cdot (460 - 435)$$

$$M_{H6} = 14819200 \text{ Nmm} \approx 14819,2 \text{ Nm}$$

$$M_{V6} = -F_{BV} (L7 - L5) - (F_{CS} + G_E) (L7 - L6)$$

$$M_{V6} = 216045 \cdot (460 - 363,5) - (121188 + 600) \cdot (460 - 435)$$

$$M_{V6} = 17803600 \text{ Nmm} \approx 17803,6 \text{ Nm}$$

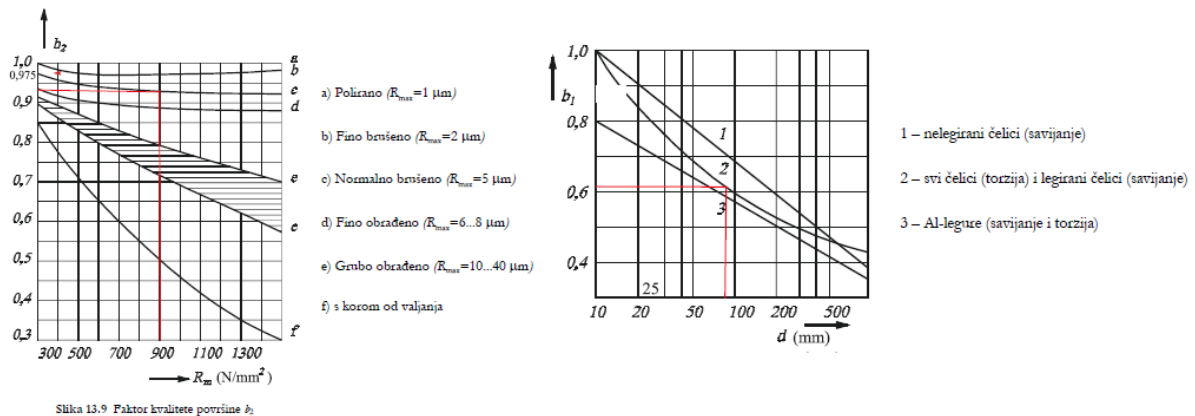
$$M_6 = \sqrt{M_{H6}^2 + M_{V6}^2}$$

$$M_6 = \sqrt{14819,2^2 + 17803,6^2} = 23164,1 \text{ Nm}$$



$$M_{red6} = \sqrt{(M_6 \times \beta_{kf})^2 + 0,75 \times (\alpha_0 \times T \times \beta_{kt})^2} = \sqrt{(23164,1 \times 1,525)^2 + 0,75 \cdot (0,9634 \cdot 869,23 \times 1,3)^2}$$

$$M_{red6} = 35337,8 \text{ Nm} = 35337800 \text{ Nmm}$$



Slika 48. Faktori površine i strojnog dijela za presjek 4,5,6

$$W_6 = \frac{\pi \times d_6^3}{32} \cong 0,1 \times d_6^3 = 0,1 \times 130^3 = 219700 \text{ mm}^3 \quad - \text{ aksijalni moment otpora}$$

$$\sigma_{f6} = \frac{M_{red6}}{W_6} = \frac{35337800}{219700} = 160,846 \text{ N/mm}^2 \quad - \text{ postojeće naprezanje}$$

$$S_{post6} = \frac{b_1 \times b_2 \times \sigma_{fDN}}{\varphi \times \beta_{kf} \times \sigma_{f6}} = \frac{0,6 \times 0,92 \times 625}{1,4 \times 1,7 \times 160,846}$$

$$S_{post6} \geq S_{potr} = 1,46 \approx 1,5$$

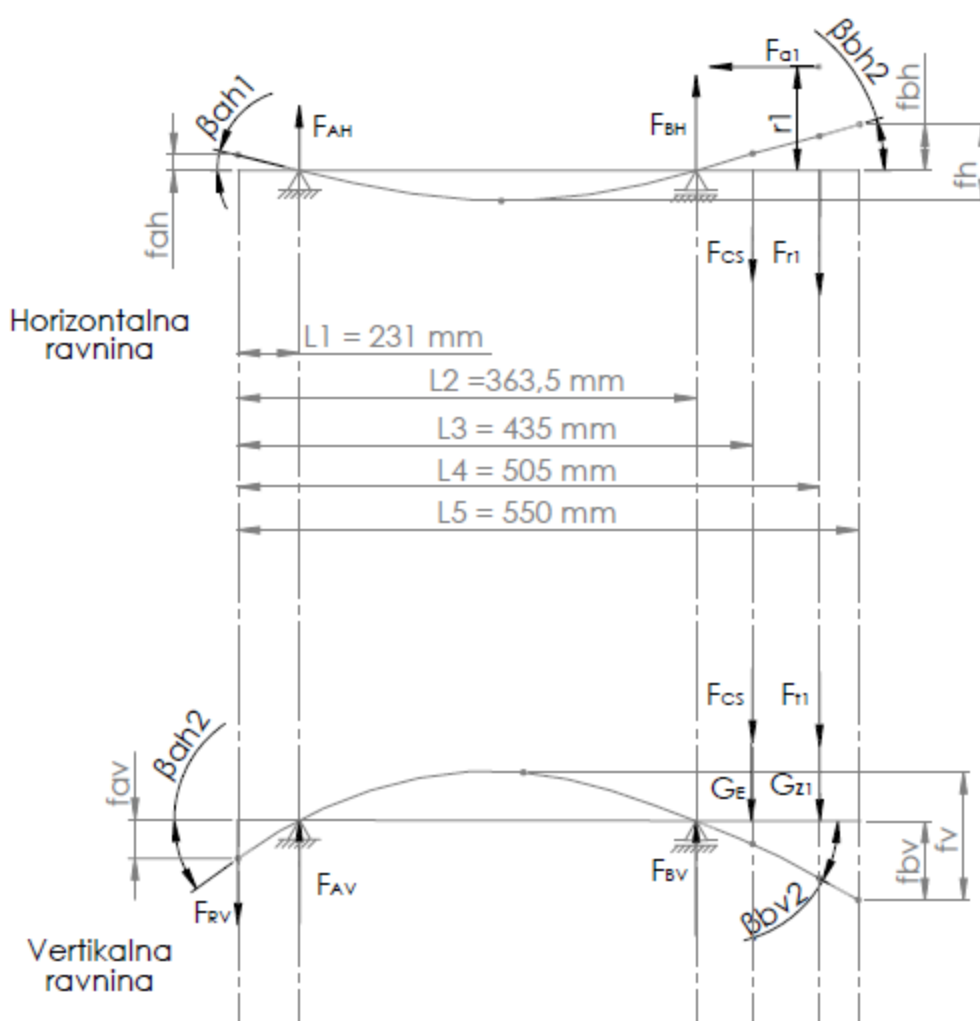
### 3.9. Elastične karakteristike vratila

#### 3.9.1 Savojne elastične deformacije vratila

$$f_{dop} = 0,00035 \times L = 0,5 \times 0,43 = 0,215 \text{ mm} \quad \text{- prema [11], str 36 i str 38}$$

$$\tan \beta \leq 0,0025 - 0,005$$

Progib vratila i nagib elastične linije



Slika 49. Nagibi i progibi elastične linije

Parcijalne horizontalne komponente radijalnih reakcija u osloncima uslijed djelovanja horizontalne sile  $F_{r1}, F_{CS}, F_{a1}$ :

$$F_{AHE} = \frac{\frac{F_{CS}}{2} \cdot (L5 - L3) + F_{r1} \cdot (L5 - L4) + F_{a1} \cdot \frac{d_1}{2}}{L} =$$

$$F_{AHE} = \frac{\frac{121188}{2} \cdot (550 - 435) + 7398,44 \cdot (550 - 505) + 5747,55 \cdot \frac{97,91}{2}}{550} =$$

$$F_{AHE} = 40554,3 \text{ N}$$

$$F_{BHE} = \frac{\frac{F_{CS}}{2} \cdot L3 + F_{r1} \cdot L4 - F_{a1} \cdot \frac{d_1}{2}}{L} =$$

$$F_{BHE} = \frac{\frac{121188}{2} \cdot 435 + 7398,44 \cdot 505 - 5747,55 \cdot \frac{97,91}{2}}{550} =$$

$$F_{BHE} = 68373,8 \text{ N}$$

Horizontalni progib konzole u osloncu A

$$f_{AHE} = \frac{F_{AHE}}{3 \times E} \times \left( \frac{l_1^3}{J_1} + \frac{l_2^3 - l_1^3}{J_2} + \frac{l_3^3 - l_2^3}{J_3} \right)$$

$$f_{AHE} = 6,8 \times \frac{F_{AHE}}{E} \times \left( \frac{l_1^3}{d_1^4} + \frac{l_2^3 - l_1^3}{d_2^4} + \frac{l_3^3 - l_2^3}{d_3^4} \right)$$

$$f_{AHE} = 6,8 \times \frac{40554,3}{210000} \times \left( \frac{231^3}{75^4} + \frac{363,5^3 - 231^3}{78^4} + \frac{435^3 - 363,5^3}{130^4} \right)$$

$$f_{AHE} = 0,0103106 \text{ mm}$$

Horizontalni progib konzole u osloncu B

$$f_{BHE} = \frac{F_{BHE}}{3 \times E} \times \left( \frac{l_1^3}{J_1} + \frac{l_2^3 - l_1^3}{J_2} + \frac{l_3^3 - l_2^3}{J_3} \right)$$

$$f_{BHE} = 6,8 \times \frac{F_{BHE}}{E} \times \left( \frac{l_1^3}{d_1^4} + \frac{l_2^3 - l_1^3}{d_2^4} + \frac{l_3^3 - l_2^3}{d_3^4} \right)$$

$$f_{BHE} = 6,8 \times \frac{68373,8}{210000} \times \left( \frac{231^3}{75^4} + \frac{363,5^3 - 231^3}{78^4} + \frac{435^3 - 363,5^3}{130^4} \right)$$

$$f_{BHE} = 0,082353 \text{ mm}$$

Parcijalne vertikalne komponente radijalnih reakcija u osloncima uslijed djelovanja horizontalne sile  $F_{r1}, F_{CS}, F_{a1}$ :

$$F_{AVE} = \frac{\left(\frac{F_{CS}}{2} + G_E\right) \cdot (L5 - L3) + F_{t1} \cdot (L5 - L4) + F_{RV} \cdot L_1}{L} =$$

$$F_{AVE} = \frac{\left(\frac{121188}{2} + 600\right) \cdot (550 - 435) + 15782,7 \cdot (550 - 505) + 360 \cdot 40}{550} =$$

$$F_{AVE} = 31477,5 \text{ N}$$

$$F_{BVE} = \frac{\left(\frac{F_{CS}}{2} + G_E\right) \cdot L3 + F_{t1} \cdot L4 + F_{RV} \cdot L_1}{L} =$$

$$F_{BVE} = \frac{\left(\frac{121188}{2} + 600\right) \cdot 435 + (15782,7 + 50) \cdot 505 + 360 \cdot 40}{550} =$$

$$F_{BVE} = 76052,3 \text{ N}$$

Horizontalni progib konzole u osloncu A

$$f_{AVE} = \frac{F_{AVE}}{3 \times E} \times \left( \frac{l_1^3}{J_1} + \frac{l_2^3 - l_1^3}{J_2} + \frac{l_3^3 - l_2^3}{J_3} \right)$$

$$f_{AVE} = 6,8 \times \frac{F_{AVE}}{E} \times \left( \frac{l_1^3}{d_1^4} + \frac{l_2^3 - l_1^3}{d_2^4} + \frac{l_3^3 - l_2^3}{d_3^4} \right)$$

$$f_{AVE} = 6,8 \times \frac{31477,5}{210000} \times \left( \frac{170^3}{75^4} + \frac{231^3 - 170^3}{78^4} + \frac{363,5^3 - 231^3}{130^4} \right)$$

$$f_{AVE} = 0,00800292 \text{ mm}$$

Horizontalni progib konzole u osloncu B

$$f_{BVE} = \frac{F_{AHE}}{3 \times E} \times \left( \frac{l_1^3}{J_1} + \frac{l_2^3 - l_1^3}{J_2} + \frac{l_3^3 - l_2^3}{J_3} \right)$$

$$f_{BVE} = 6,8 \times \frac{F_{AHE}}{E} \times \left( \frac{l_1^3}{d_1^4} + \frac{l_2^3 - l_1^3}{d_2^4} + \frac{l_3^3 - l_2^3}{d_3^4} \right)$$

$$f_{BVE} = 6,8 \times \frac{76052,3}{210000} \times \left( \frac{363,5^3}{75^4} + \frac{435^3 - 363,5^3}{78^4} + \frac{505^3 - 435^3}{130^4} \right)$$

$$f_{BVE} = 0,09106023 \text{ mm}$$

*Ukupni ili maksimalni rezultirajući progib vratila*

$$f = \sqrt{f_{BHE}^2 + f_{BVE}^2}$$

$$f = \sqrt{0,082353^2 + 0,0910602^2}$$

$$f = 0,123179 \text{ mm} \leq f_{dop} = 0,215 \text{ mm}$$

Uvjet **zadovoljava**.

Treba napomenuti da je vratilo skraćeno kako bi progibi zadovoljavali. U prvotnoj varijanti progib je odstupao do duplo od dopuštene vrijednosti

*Nagib parcijalne elastične linije u osloncima vratila:*

U osloncu A horizontalna ravnina:

$$J_1 = \frac{\pi \times d^4}{64} \text{ za puni kružni presjek}$$

$$\tan \beta_{1AH} = \frac{1}{2} \times \frac{F_{AHE} \times l_1^2}{E \times J_1} = 10,2 \times \frac{40554,3 \times 231^2}{210000 \times 75^4}$$

$$\tan \beta_{1AH} = 9,96077 \times 10^{-5}$$

$$\tan \beta_{2AH} = \frac{1}{2} \times \frac{F_{AHE} \times (l_2^2 - l_1^2)}{E \times J_2} = 10,2 \times \frac{40554,3 \times (363,5^2 - 231^2)}{210000 \times 80^4}$$

$$\tan \beta_{2AH} = 4,03959 \times 10^{-4}$$

$$\tan \beta_{3AH} = \frac{1}{2} \times \frac{F_{AHE} \times (l_3^2 - l_2^2)}{E \times J_3} = 10,2 \times \frac{40554,3 \times (435^2 - 363,5^2)}{210000 \times 75^4}$$

$$\tan \beta_{3AH} = 3,62079 \times 10^{-4}$$

$$\tan \alpha_{AH} = \frac{f_{BHE} - f_{AHE}}{l} = \frac{0,082353 - 0,0103106}{330} = 2,1831 \times 10^{-4}$$

$$\tan \beta_{AH} = \tan(\beta_{1H} + \beta_{2H} + \beta_{3H} - \alpha_H)$$

$$\tan \beta_{AH} = 1,08396 \times 10^{-3}$$

U osloncu A vertikalna ravnina:

$$J_1 = \frac{\pi \times d^4}{64} \text{ za puni kružni presjek}$$

$$\tan \beta_{1AV} = \frac{1}{2} \times \frac{F_{AVE} \times l_1^2}{E \times J_1} = 10,2 \times \frac{31477,5 \times 231^2}{210000 \times 75^4}$$

$$\tan \beta_{1AV} = 1,08722 \times 10^{-3}$$

$$\tan \beta_{2AV} = \frac{1}{2} \times \frac{F_{AVE} \times (l_2^2 - l_1^2)}{E \times J_2} = 10,2 \times \frac{31477,5 \times (363,5^2 - 231^2)}{210000 \times 80^4}$$

$$\tan \beta_{2AV} = 8,0626 \times 10^{-4}$$

$$\tan \beta_{3AV} = \frac{1}{2} \times \frac{F_{AVE} \times (l_3^2 - l_2^2)}{E \times J_3} = 10,2 \times \frac{31477,5 \times (435^2 - 363,5^2)}{210000 \times 75^4}$$

$$\tan \beta_{3AV} = 9,84976 \times 10^{-5}$$

$$\tan \alpha_{AV} = \frac{f_{BVE} - f_{AVE}}{l} = \frac{0,09106023 - 0,0080029}{330} = 2,51689 \times 10^{-4}$$

$$\tan \beta_{AV} = \tan(\beta_{1V} + \beta_{2V} + \beta_{3V} - \alpha_{AV})$$

$$\tan \beta_{AV} = 2,24367 \times 10^{-3}$$

U osloncu B horizontalna ravnina:

$$J_1 = \frac{\pi \times d^4}{64} \text{ za puni kružni presjek}$$

$$\tan \beta_{1BH} = \frac{1}{2} \times \frac{F_{BHE} \times l_1^2}{E \times J_1} = 10,2 \times \frac{68373,8 \times 363,5^2}{210000 \times 75^4}$$

$$\tan \beta_{1BH} = 1,67937 \times 10^{-4}$$

$$\tan \beta_{2BH} = \frac{1}{2} \times \frac{F_{BHE} \times (l_2^2 - l_1^2)}{E \times J_2} = 10,2 \times \frac{68373,8 \times (435^2 - 363,5^2)}{210000 \times 80^4}$$

$$\tan \beta_{2BH} = 6,81067 \times 10^{-4}$$

$$\tan \beta_{3BH} = \frac{1}{2} \times \frac{F_{BHE} \times (l_3^2 - l_2^2)}{E \times J_3} = 10,2 \times \frac{68373,8 \times (505^2 - 435^2)}{210000 \times 130^4}$$

$$\tan \beta_{3BH} = 6,10459 \times 10^{-3}$$

$$\tan \alpha_{BH} = \frac{f_{BHE} - f_{AHE}}{l} = \frac{0,082353 - 0,0103106}{330} = 2,1831 \times 10^{-4}$$

$$\tan \beta_{BH} = \tan(\beta_{1BH} + \beta_{2BH} + \beta_{3BH} + \alpha_{BH})$$

$$\tan \beta_{BH} = 1,6777 \times 10^{-3}$$

U osloncu B vertikalna ravnina:

$$J_1 = \frac{\pi \times d^4}{64} \text{ za puni kružni presjek}$$

$$\tan \beta_{1BV} = \frac{1}{2} \times \frac{F_{BVE} \times l_1^2}{E \times J_1} = 10,2 \times \frac{76052,3 \times 363,5^2}{210000 \times 75^4}$$

$$\tan \beta_{1BV} = 1,26679 \times 10^{-3}$$

$$\tan \beta_{2BV} = \frac{1}{2} \times \frac{F_{BVE} \times (l_2^2 - l_1^2)}{E \times J_2} = 10,2 \times \frac{76052,3 \times (435^2 - 363,5^2)}{210000 \times 80^4}$$

$$\tan \beta_{2BV} = 1,94799 \times 10^{-3}$$

$$\tan \beta_{3BV} = \frac{1}{2} \times \frac{F_{BVE} \times (l_3^2 - l_2^2)}{E \times J_3} = 10,2 \times \frac{76052,3 \times (505^2 - 435^2)}{210000 \times 75^4}$$

$$\tan \beta_{3BV} = 2,3797 \times 10^{-4}$$

$$\tan \alpha_{BV} = \frac{f_{BVE} - f_{AVE}}{l} = \frac{0,09106023 - 0,0080029}{330} = 2,51689 \times 10^{-4}$$

$$\tan \beta_{BV} = \tan(\beta_{1V} + \beta_{2V} + \beta_{3V} - \alpha_{AV})$$

$$\tan \beta_{BV} = 3,7044 \times 10^{-3}$$

Ukupni progibi na osloncu A i B

$$\tan \beta_A = \sqrt{\tan \beta_{AH}^2 + \tan \beta_{AV}^2}$$

$$\tan \beta_A = \sqrt{(1,08396 \times 10^{-3})^2 + (2,24367 \times 10^{-3})^2}$$

$$\tan \beta_A = 0,00249179 \leq 0,005$$

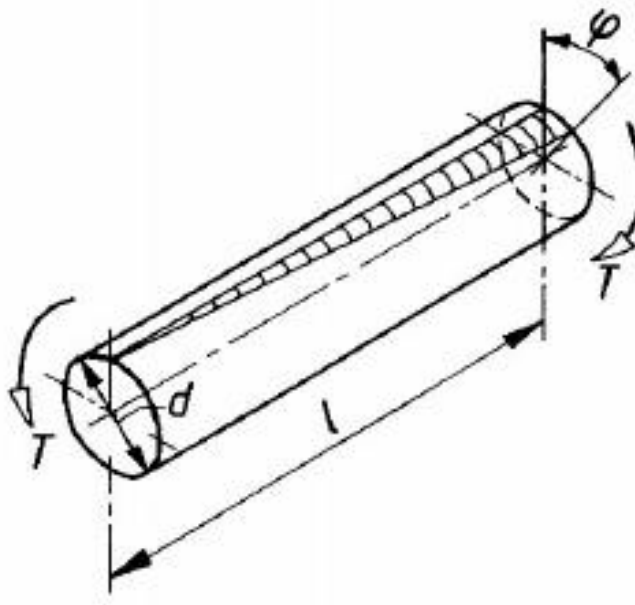
$$\tan \beta_B = \sqrt{\tan \beta_{BH}^2 + \tan \beta_{BV}^2}$$

$$\tan \beta_B = \sqrt{(1,67777 \times 10^{-3})^2 + (3,70445 \times 10^{-3})^2}$$

$$\tan \beta_B = 0,0040668 \leq 0,005$$

### 3.9.2 Uvojne elastične deformacije vratila

Bitna kontrola za provjeru vratila je kut uvijanja vratila



Slika 50. Kut uvijanja vratila

$$I_p = \frac{d^4 \pi}{32}$$

$$\hat{\psi} = \frac{T}{G} \times \left( \frac{l_1}{I_{p1}} + \frac{l_2}{I_{p2}} + \frac{l_3}{I_{p3}} \right) \quad - \text{prema [11], str 37}$$

$$\hat{\psi}_{dop} = 0,25 \times 0,33 = 0,0825 \text{ rad}$$

$$\hat{\psi} = \frac{T}{G} \times \left( \frac{l_1}{I_{p1}} + \frac{l_2}{I_{p2}} + \frac{l_3}{I_{p3}} \right) = \frac{T_1}{G} \times \left( \frac{l_1}{\frac{d_1^4 \pi}{32}} + \frac{l_2}{\frac{d_2^4 \pi}{32}} + \frac{l_3}{\frac{d_3^4 \pi}{32}} \right)$$

$$\hat{\psi} = \frac{869,23}{8 \times 10^4} \times \left( \frac{170}{\frac{75^4 \pi}{32}} + \frac{61}{\frac{80^4 \pi}{32}} + \frac{229}{\frac{90^4 \pi}{32}} \right)$$

$$\hat{\psi} = 3,394 \times 10^{-7} \leq 0,0825 = \hat{\psi}_{dop}$$



### 3.10. Proračun kritične brzine vratila

#### 3.10.1 Kritična brzina kod savijanja

$$n_k \approx \frac{K}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{m}} = \frac{K}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{f_g}}$$

$n_k$  [s<sup>-1</sup>] - kritična brzina vrtnje

$K$  - faktor načina uležištenja =1 za vratila koja se slobodno okreću u ležajima.

$c$  - krutost sustava

$m$  [kg] - masa sustava

$g$  [m/s<sup>2</sup>] - 9,81 (za uvjete srednjih geografskih širina)

$f_g$  [mm] - ukupni progib vratila uslijed težine rotirajućih masa zupčanika  $Z_2$  i  $Z_3$ .

Ukupni progib vratila  $f_G$

$$F_B = \frac{G_{z1} \cdot L4 + G_E \cdot L3}{L5} = \frac{50 \cdot 505 + 600 \cdot 435}{550} = 520,45 \text{ N}$$

$$f_B = \frac{F_{B3} \cdot 6,8}{E} \cdot \left[ \frac{(L4 - L3)^3}{d_3^4} + \frac{(L4 - L2)^3 - (L4 - L3)^3}{d_3^4} \right]$$

$$f_B = \frac{520,45 \cdot 6,8}{210000} \cdot \left[ \frac{70^3}{130^4} + \frac{171,5^3 - 70^3}{130^4} \right]$$

$$f_{B3} = 2,976 \times 10^{-4} \text{ mm}$$

$$n_k = \frac{K}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{f_g}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{9,81 \cdot 10^3}{2,976 \cdot 10^{-4}}} = 288,96 \text{ s}^{-1}$$

#### 3.10.1 Kritična brzina kod uvijanja

$$n_k = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{J_3}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{556,35 \times 10^6}{0,311}} = 29391,1 \text{ [s}^{-1}\text{]}$$

$$\frac{1}{c} = \frac{32}{G \times \pi} \times \left[ \frac{L4 - L3}{d_3^4} + \frac{L4 - L2}{d_3^4} \right]$$

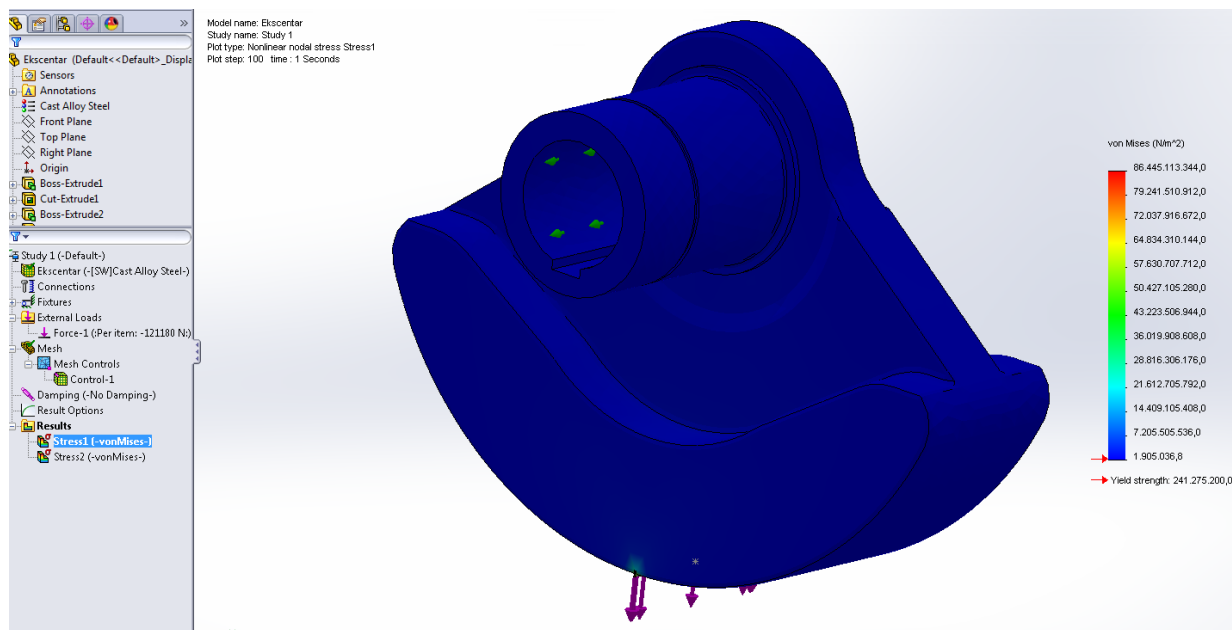
$$\frac{1}{c} = \frac{32}{\pi \cdot 80 \cdot 10^3} \cdot \left[ \frac{505 - 435}{130^4} + \frac{505 - 363,5}{130^4} \right]$$

$$\frac{1}{c} = 9,4286 \times 10^{-11}$$

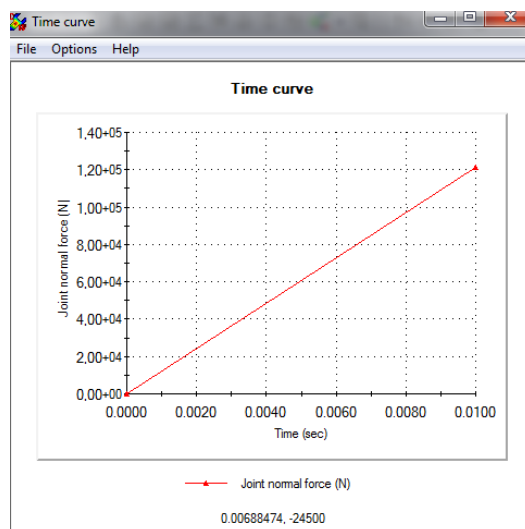
### 3.11. Proračun kritičnih presjeka konvejera

#### 3.11.1 Proračun kritičnog presjeka ekscentra

Potrebno je provjeriti da li postoji opasna zona na ekscentritetu. To je napravljeno u programskom paketu SolidWorks Simulatin, i prema slici vidljivo je da nema opasnog presjeka. Treba napomenuti da su postavljeni rubni uvjeti kakvi jesu na uređaju, tj. broj okretaja je 100 u sekundi, sila je pola od ukupne centrifugalne i uređaj je fiksiran kao ležaj



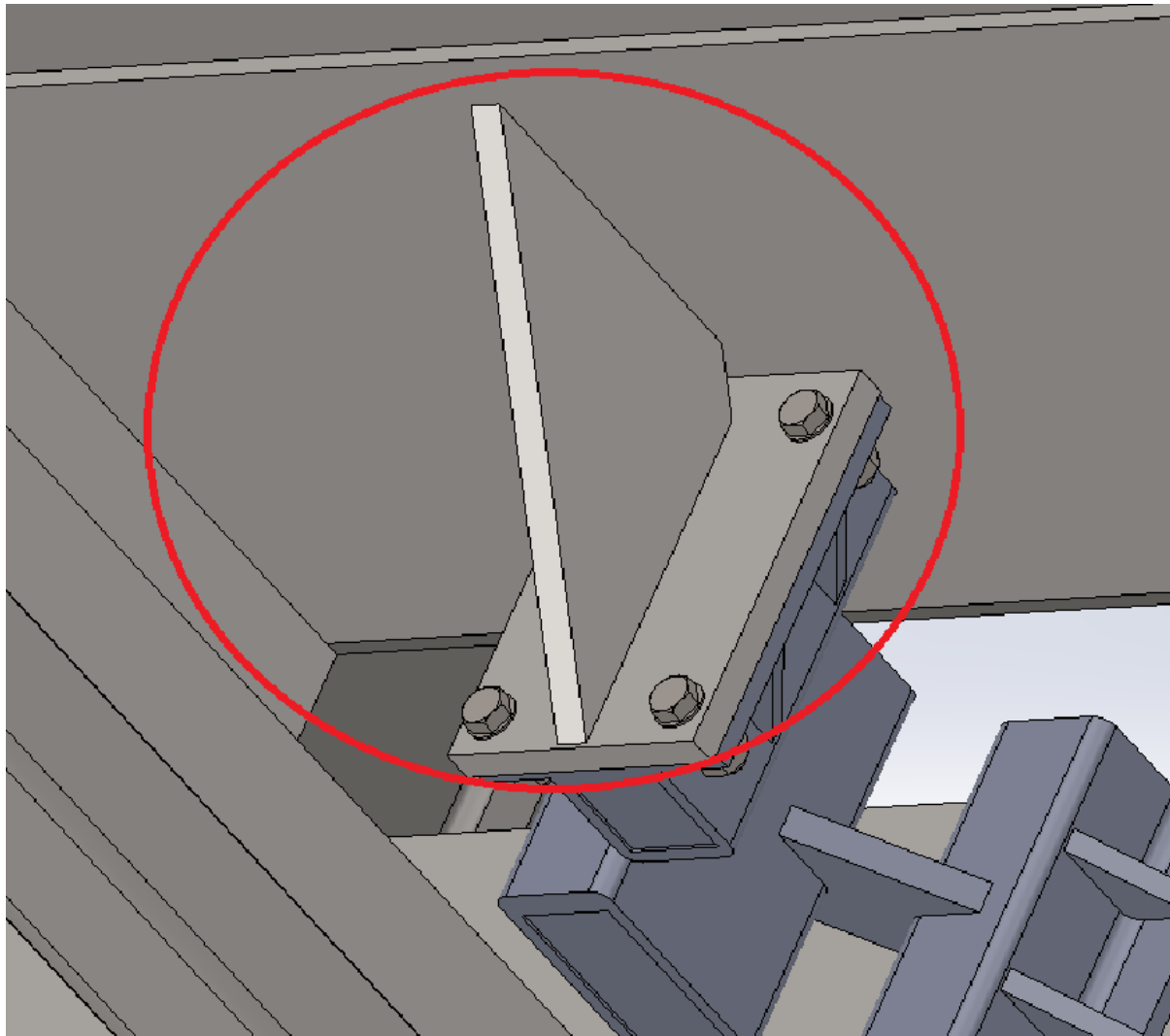
Slika 51. Simulacija kritičnih presjeka na ekscentru



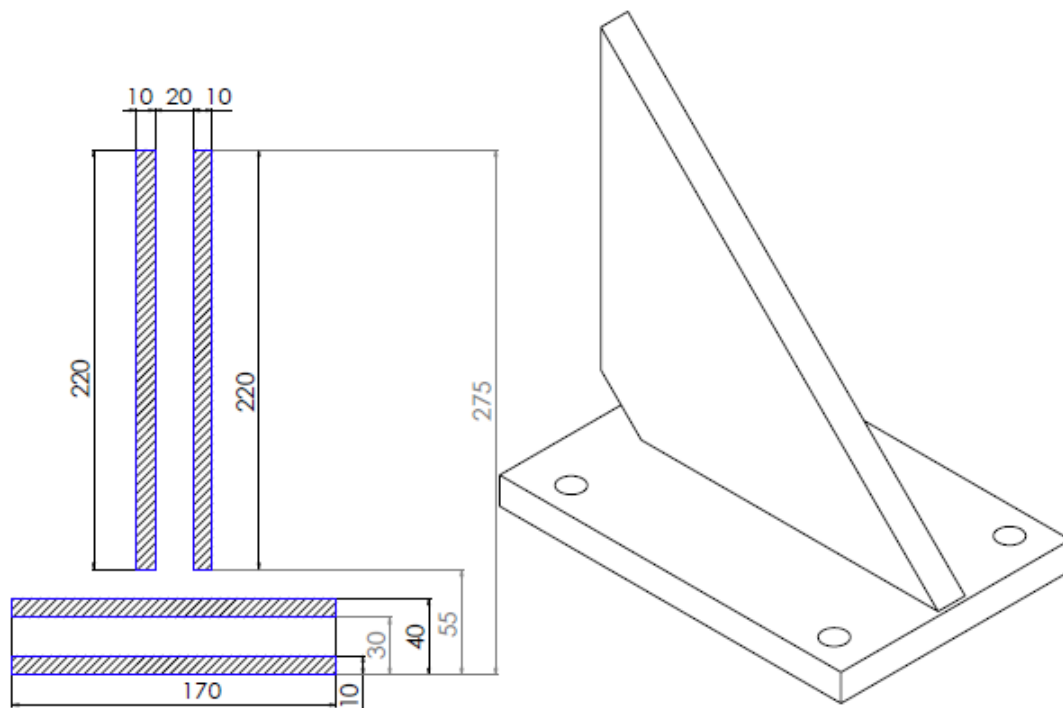
Slika 52. Krivulja ubrzanja

### 3.11.2 Proračun kritičnog presjeka ekscentra

Poželjno je provjeriti i kritične zavare na uređaju. Glavni fokus će biti na zavarima na koje djeluje ekscentar. Treba uzeti da centrifugalna sila djeluje na osam nosača



Slika 53. Kritične točke zavora



Slika 54. Pločica i površine zavora

Ordinata težišta površine zavora

$$y_t = \frac{\sum A_i \cdot y_i}{\sum A_i} = \frac{2 \cdot 220 \cdot 10 \cdot 165 + 10 \cdot 170 \cdot 5 + 10 \cdot 170 \cdot 35}{2 \cdot 220 \cdot 10 + 2 \cdot 170 \cdot 10} = 101,795 \text{ mm}$$

Moment tromosti nosive površine zavora

$$I_x = \sum \frac{b \cdot h^3}{12} + \sum A_i \cdot (y_t - y_i)^2$$

$$I_x = 2 \cdot \frac{220^3 \cdot 10}{12} + 2 \cdot \frac{170 \cdot 10^3}{12} + 2 \cdot 10 \cdot 220 \cdot (101,795 - 165)^2 + 10 \cdot 170 \cdot (101,795 - 5)^2 + 10 \cdot 170 \cdot (101,795 - 35)^2$$

$$I_x = 5,8865 \times 10^7$$

Sila na zavarima

$$F_{sz} = \frac{F_{cs}}{8} = \frac{242327}{8} = 30290,9 \text{ N}$$

Naprezanje uslijed savijanja nosive površine zavora

$$\sigma_{s\perp} = \frac{F_{sz} \cdot L_x}{I_x} y_t = \frac{30290,9 \cdot 253}{5,8865 \times 10^7} 101,795 = 13,25 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Površina smicanja, svi zavari okomiti na smjer djelovanja sile

$$A_s = 2 \cdot 10 \cdot 220 = 4400 \text{ mm}^2$$

Naprezanje zavora uslijed smicanja

$$\tau_{s\perp} = \frac{F_{sz}}{A_s} = \frac{30290,9}{4400} = 6,89 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Ekvivalentno naprezanje nosive površine zavora

$$\sigma_{ekv} = \frac{1}{2} \cdot \sigma_{s\perp} + \sqrt{\sigma_{s\perp}^2 + 4 \cdot \tau_{s\perp}^2} = \frac{1}{2} \cdot 13,25 + \sqrt{13,25^2 + 4 \cdot 6,89^2}$$

$$\sigma_{ekv} = 25,74 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$b_{zv} = 0,8$  - faktor kvalitete za zavar srednje kvalitete

$\beta_k = 2,27$  - efektivni faktor koncentracije naprezanja

$R_{-1} = 235 \text{ N/mm}^2$  - trajna dinamička čvrstoća za čelik St 60-2

$S_z = 2$  - faktor sigurnosti zavarenog spoja

Za dinamičko opterećeni zavar, ciklusom s koeficijentom asimetrije  $r = -1$ , dopušteno naprezanje

$$\sigma_{Dzv,dop} = \frac{b_{zv} \cdot R_{-1}}{\beta_k \cdot S_z} = \frac{0,8 \cdot 235}{2,27 \cdot 2} = 41,41 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Zavari zadovoljavaju

## 4. ZAKLJUČAK

Vibracijski konvjer je dizajniran da bi zadovoljio tražene uvjete koji su bili zadani. Postoje mala odstupanja u visini, ali to je iz razloga jer je postavljena ploča kako bi se elektromotor odvojio od vibracijske strukture. Uglavnom su korišteni standardni dijelovi radi lakše jednostavnosti, a i takvi dijelovi osim što su jeftiniji, lako su i dobavljivi. Cijeli uređaj se sastoji od tri dijela, vibracijske ploče i elektromotora, a dodano je postolje ispod vibracijske ploče koje nije nužno za ovaj uređaj. Naime, ako elektromotor nema osigurano postolje zgodno je imati rješenje i za taj slučaj.

Kut uzbudne sile se regulira zakretanjem mase ekscentra

Izdvajanje materijala koji je višak je osigurano pločom koja se montira na prednji dio ploče. Visina se regulira sa rupama na ploči koje su zatvorene sa plitkim vijcima.

Odvajanjem elektromotora od mase koja vibrira ušteda na masi je oko 600 kg i to predstavlja smanjenje mase za oko 15%.

Uređaj radi u nadrezonantnom polju i stoga nema opasnosti da uđe u rezonancu. Jedinu opasnost predstavlja početak rada stroja i kraj rada, tada dolazi do značajnog porasta amplitude

## LITERATURA

- [1] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Tehnička knjiga Zagreb, 1970.
- [2] Decker, K. H.: Elementi strojeva, Tehnička knjiga Zagreb, 2006.
- [3] Herold, Z.: Računalna i inženjerska grafika, Zagreb, 2003.
- [4] <http://www.hidrel.hr/sljuncara/sljuncara.htm>
- [5] Rosta Oscillating Mountings
- [6] <http://www.wattdrive.com/en/e-catalog-cat4cad.html>
- [7] [http://50.244.15.10/techlib/ABB/ABB\\_ACS-600\\_AC\\_Drives.pdf](http://50.244.15.10/techlib/ABB/ABB_ACS-600_AC_Drives.pdf)
- [8] Fenner friction belt drives
- [9] Oberšmit, E. : Ozubljenja i zupčanici, SNL Zagreb, 1982
- [10] Podrug, S. : Elementi strojeva 2, Zbirka zadataka, Split 2006
- [11] Zelenika, S : Konstrukcijski Elementi I, 2010/2011
- [12] <http://www.skf.com/>
- [13] Podrug, S. : Elementi strojeva 1, Zbirka zadataka, Split 2004
- [14] IBC Cylindrical roller bearings
- [15] Stegić, M : Teorija vibracija linearni diskretnih matematičkih sustava, 1996
- [16] Rao, S. Singiresu : Mechanical Vibrations 5th Edition, 2011
- [17] Hibbeler, C. Russell : Engineering Mechanics : Statics & Dynamics, 2012
- [18] Pustaic, D. ; Wolf, H. ; Tonković, Z. : Mehanika 3, Tehnička knjiga 2005
- [19] Jelaska, D. : Elementi strojeva 2011,
- [20] Renold Ajax vibratory conveyors
- [21] Kinergy Driven Vibrating Conveyors
- [22] Modelling and Control of Electromagnetic Vibratory Actuator Applied in Vibratory Conveying Drives
- [23] Generalni katalog italvibras 2000
- [24] POSI FLOW Vibrating conveyors
- [25] Carman vibratin conveyors
- [26] Copenhagen Vibrator Products
- [27] Uras Techno Powertronics
- [28] Piezoelectric Driving of Vibration Conveyors: An Experimental Assessment

## **PRILOZI**

- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija